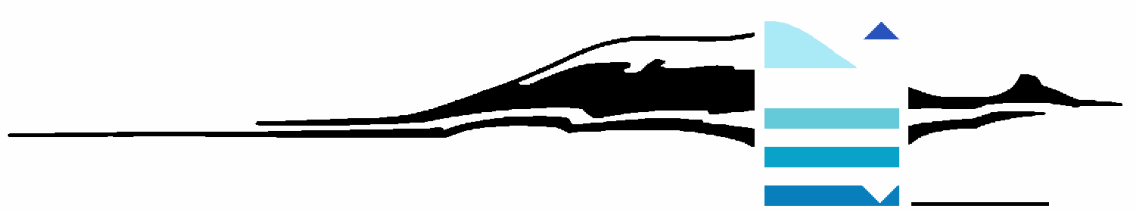


MOUNT KILIMANJARO EXPEDITION 1999





**Die Berechnung der vorläufigen orthometrischen Höhe des Kilimanjaro
von Nikolaos Angelakis (Fachhochschule Karlsruhe)
email: anni0011@fh-karlsruhe.de oder angelakis@gmx.de**

Inhalt:

1. Die Messungen
2. Die Auswertung
 - 2.1. Datenbezug aus dem Internet
 - 2.1.1. Konvertierung des Datums
 - 2.1.2. Die Beobachtungsdateien
 - 2.1.3. Dekomprimierung der Beobachtungsdateien
 - 2.1.4. Hochgenaue Satellitenbahndaten, Ionosphärenmodelle und Koordinaten der IGS-Stationen
 - 2.2. Das EGM96
3. Die vorläufigen Ergebnisse (Stand Oktober 1999)
4. Die endgültigen Ergebnisse

1. Die Messungen

Am 20.9.1999 begannen die Messungen der Mount Kilimanjaro Expedition 1999 auf dem Dach des Philip Hotels in Moshi mit den ersten Beobachtungen auf der dort eingerichteten Permanentstation und endeten eine Woche später am 27.9.1999 mit der Rückkehr des Teams, das am Tag zuvor den Gipfel des Kilimanjaro, den Uhuru Peak, bestiegen hatte.

Die Messungen wurden mit Hilfe des Global Positioning System (GPS) durchgeführt und deren Aufbau ist, ausgehend von der Permanentstation in Moshi, in Abb.1 skizziert. Hier werden die Punkte gezeigt, die direkt für die Höhenbestimmung des Uhuru Peaks verwendet wurden, sowie weitere Punkte, die von Interesse sind, wie z.B. Hütten.

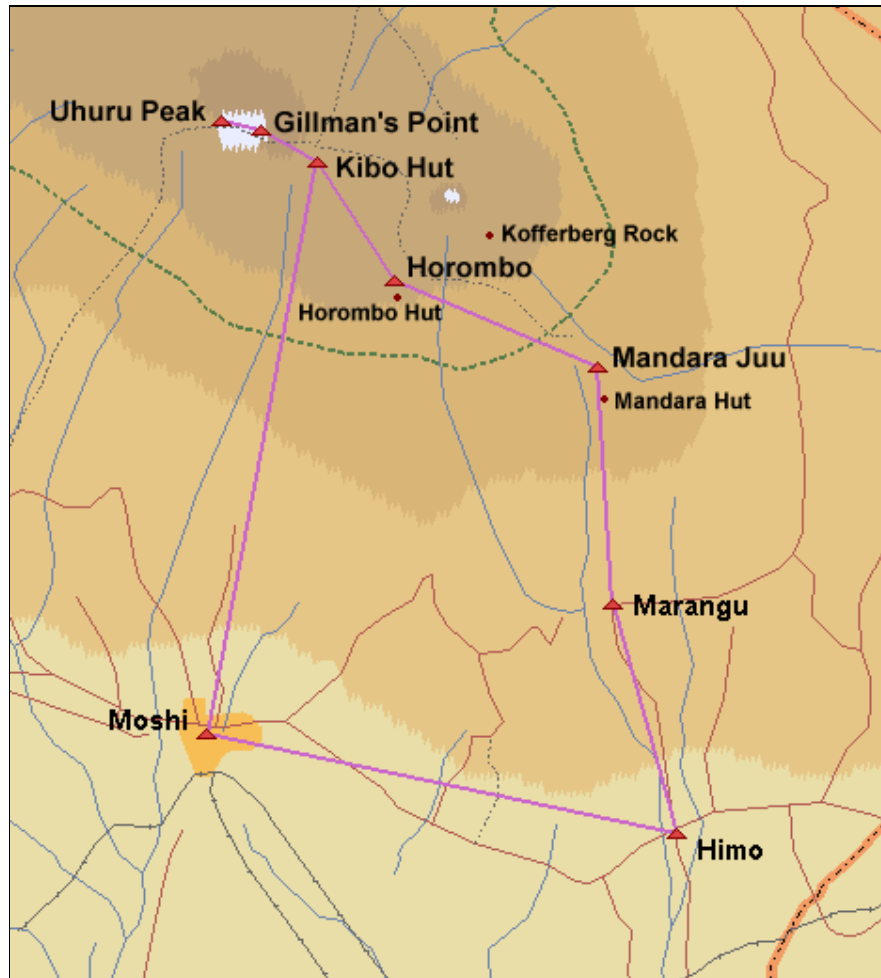


Abb. 1

Es war notwendig, die Messungen so zu planen, daß auf dem Weg zum Gipfel mehrere Zwischenpunkte liegen sollten, um die bei großen Höhenunterschieden kritischen troposphärischen Einflüsse zu vermeiden. Die jeweilige Beobachtungsdauer betrug zwischen ca. 1,5 bis zu 24 Stunden für die Bestimmung von ITRF-Koordinaten (Kap. 2). Die Länge der Meßzeit ist grundsätzlich von der Entfernung der Punkte abhängig, auf denen simultan ein GPS-Empfänger aufgebaut ist. Die Messung auf dem Gipfel wurde mit dem stop&go-Verfahren durchgeführt, um lange Beobachtungszeiten in dieser Höhe bei den vorherrschenden klimatischen Bedingungen zu vermeiden. Hierzu wurde auf einem „festen“ Punkt ein Stativ mit Empfänger aufgebaut und mit einem „mobilen“ Empfänger wurden unterschiedlich Punkte angemessen, da nicht eindeutig festzulegen war, welche Stelle die höchstgelegene ist. Die Meßdauer hier betrug lediglich eine Minute pro Punkt.

Parallel zu den Messungen am Berg war ein weiteres Team in der näheren Umgebung des Kilimanjaro damit beschäftigt, Lage- und Höhenfestpunkte zu besetzen um somit das tansanische System an das ITRF anzubinden und umgekehrt, die ITRF-Höhe des Kilimanjaro auch im lokalen Höhensystem zu ermitteln.

Abschließend ist zu erwähnen, daß der Großteil der Messungen zweimal unabhängig voneinander durchgeführt wurden, um so eine Kontrollierbarkeit der Beobachtungen zu erreichen.

2. Die Auswertung

Ein erstes Ziel der Auswertung der von den Satelliten empfangenen Daten (Phasen- und Codemessungen) war die Berechnung der geozentrischen Koordinaten des Kilimanjaro im Datum des weltweiten Referenzsystems, dem ITRF (International Terrestrial Reference Frame), welchem als Projektionsfläche das Ellipsoid WGS-84 zugrunde liegt. Das zweite Ziel war die Ermittlung der orthometrischen Höhe („Meereshöhe“).

Zunächst war es nötig die Permanentstation in Moshi in das ITRF einzuschalten, an welche im weiteren Verlauf die anderen Messungen angehängt wurden. Hierzu stehen dem Auswerter im Internet die Beobachtungsdateien von weltweit knapp 200 nonstop messenden Stationen des IGS (International GPS Service) zur Verfügung, sowie hochgenaue Satellitenbahndaten, globale Ionosphärenmodelle und die ITRF-Koordinaten der IGS-Stationen (Kap. 2.1). In unserem Fall wurde Moshi mit Hilfe der Permanentstationen Ascension Islands, Sutherlands, Hartebeesthoek, Malindi und Seychellen (Abb. 2) bestimmt und zusätzlich, zur Kontrolle, die Koordinaten von Himo auf demselben Wege ermittelt. Diese zwei Punkte ergaben die Basis auf der die weiteren Berechnungen aufbauten.



Abb. 2

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurden die in Abb. 1 gezeigten Baselines berechnet. Das erste Ergebnis waren die geographischen Lagekoordinaten (B, L) und die ellipsoidische Höhe h des am Uhuru Peak höchstgelegenen mit GPS gemessenen Punktes.

Der letzte Schritt war die Bestimmung der Geoidhöhe mit Hilfe des Earth Geoid Model 96 (EGM96) und die Berechnung der endgültigen orthometrischen Höhe („Meereshöhe“) (Kap. 2.2).

2.1. Datenbezug aus dem Internet

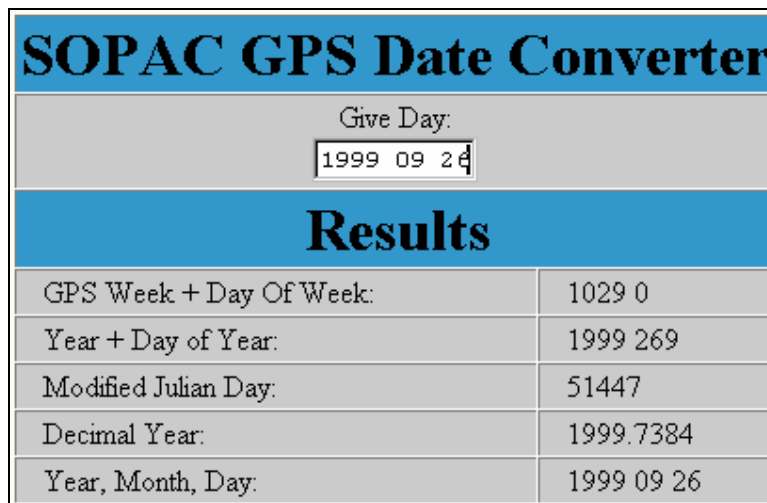
Für diesen Teil der Auswertung benötigten wir einen möglichst schnellen Zugang in das Internet, da eine sehr große Datenmenge aus dem Netz zu holen war. Den Zugang erhielten wir bei dem, erst eine Woche jungen, Rechenzentrum der Universität in Dar Es Salaam, das mit modernsten Computern ausgestattet ist, so daß dieser Arbeitsschritt nur ca. 2 Stunden in Anspruch nahm.

2.1.1. Konvertierung des Datums

Im Internet sind die benötigten Daten nicht Tag für Tag nach dem gregorianischen Kalender archiviert, sondern sind mit Hilfe eines bestimmten Formates abzurufen (Abb. 3). Der „Date Converter“ ist in der homepage von SOPAC (Scripps Orbit Permanent Array Center) unter der Adresse

<http://lox.ucsd.edu>

zu finden.



SOPAC GPS Date Converter	
Give Day: 1999 09 26	
Results	
GPS Week + Day Of Week:	1029 0
Year + Day of Year:	1999 269
Modified Julian Day:	51447
Decimal Year:	1999.7384
Year, Month, Day:	1999 09 26

Abb. 3

Hier sind die ersten beiden Angaben im Format wwwwd und yyddd wichtig.

2.1.2. Die Beobachtungsdateien

Unter der selben Adresse sind auch die Beobachtungsdateien der zu benutzenden IGS-Stationen zu finden. Die folgende Tabelle zeigt welche Dateien bei der Mount Kilimanjaro Expedition 1999 heruntergeladen wurden. Nur Ascension Islands wird hier aufgeführt, da für die restlichen IGS-Stationen (Abb. 2) das analoge gilt.

Station	Datum	Datei
Ascension Islands	22.9.99 → 99265	asc12650_99o.Z
	23.9.99 → 99266	asc12660_99o.Z
	25.9.99 → 99268	asc12680_99o.Z
	26.9.99 → 99269	asc12690_99o.Z
	27.9.99 → 99270	asc12700_99o.Z

2.1.3. Dekomprimierung der Beobachtungsdateien

Da die in Kap.2.1.2 erwähnten Dateien in einem komprimierten UNIX-Format vom Netz geladen wurden müssen diese in ein lesbares ASCII-Format umgewandelt werden. Zu diesem Zweck bietet GIBS (GPS-Informations- und Beobachtungssysteme) unter der Internet-Adresse

<http://gibs.leipzig.ifag.de>

die Software DECOMPRESS an. Als Ausgabe erhält man die Beobachtungsdatei im RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format), in dem u.a. Stationsname, Antennentyp und -höhe, Koordinaten und Beobachtungen zu sehen sind (Abb. 4).

```

2.00          OBSERVATION DATA      G (GPS)          RINEX VERSION / TYPE
teqc 1999Jul19      GPSOPS account      19990928 00:40:56UTCPGM / RUN BY /
DATE
Solaris 2.3|S-Sparc|cc SC3.0|=+|*Sparc          COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION      COMMENT
mali          MARKER NAME
33201M001          MARKER NUMBER
AUTOMATIC          ESA/ESOC          OBSERVER /
AGENCY
230          ROGUE SNR-12 RM      3.2.32.9          REC # / TYPE /
VERS
-Unknown-          AOAD/M_T          ANT # / TYPE
      4865366.5007  4110737.4576  -331121.7282          APPROX POSITION
XYZ
      0.1347          0.0000          0.0000          ANTENNA: DELTA
H/E/N
      1      1          WAVELENGTH FACT
L1/2
      5      L1      L2      C1      P2      P1          # / TYPES OF
OBSERV
      30.0000          INTERVAL
Forced Modulo Decimation to 30 seconds          COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [1,4-9]          COMMENT
SNR:  >316  >100  >31.6  >10  >3.2  >0 bad=0          COMMENT
L1 & L2:    9      8      7      6      5      4      1          COMMENT
      1999    9      26    20    56    30.0000000    GPS          TIME OF FIRST
OBS
          END OF HEADER

99  9 26 20 56 30.0000000  0  8G24G 6G 9G 5G10G17G 8G26
5831930.53049  4544382.10244  22189259.2274  22189262.7984
-3104135.99948  -2418768.80044  23306041.0744  23306044.7224
-20021190.51749  -15600922.84345  20442467.1964  20442468.8024
-2169094.34148  -1690200.68944  23101188.9184  23101191.7894
-525154.19746  -409211.13444  22594331.5264  22594333.6474
-573993.65847          24137616.6804
-12209596.72549  -9513949.07944  21831716.8244  21831718.5144
-8612406.47549  -6710953.99644  22628689.1094  22628692.0724
99  9 26 20 57 0.0000000  0  8G24G 6G 9G 5G10G17G 8G26
5917723.84649  4611234.05744  22205584.6084  22205588.1904
-3090114.16548  -2407842.64444  23308709.0814  23308713.5664
-20034436.54149  -15611244.39845  20439946.3934  20439947.8484
-2223678.29649  -1732733.53244  23090802.5284  23090804.7054
-539418.24846  -420325.66244  22591617.6424  22591617.7074
-669350.61146  -521567.36444  24119469.4264  24119477.6174
-12292696.51849  -9578702.12844  21815903.4264  21815903.9724
-8565977.55949  -6674775.48244  22637524.2964  22637527.7744

```

Abb. 4

2.1.4. Hochgenaue Satellitenbahndaten, Ionosphärenmodelle und Koordinaten der IGS-Stationen

Um die oben genannten Dateien zu erhalten, muß man sich in den ftp-Server (File Transfer Protocol) des astronomischen Instituts Bern unter

<ftp://ubeclu.unibe.ch>

einloggen.

Die folgenden Befehlsreihen zeigen in welchen Ordnern sich die Dateien befinden.

- Hochgenaue Satellitenbahndaten:
ftp>cd aiub\$ftp
ftp>cd code
ftp>get codwwwwd.eph (die Endung „eph“ für ephemerides muß in „pre“ für predicted geändert werden)
- Ionosphärenmodelle:
ftp>cd aiub\$ftp
ftp>cd code
ftp>get codwwwwd.ion
- Koordinaten der IGS-Stationen:
ftp>cd aiub\$ftp
ftp>cd bswuser
ftp>cd sta
ftp>get itrmmmy.crd

2.2 Das EGM96

Nach Abschluß der Baselineberechnungen mit der Bernese GPS Software Version 4.0 und der Firmensoftware Leica SKI-Pro Version 1.1 standen die geographischen Koordinaten in Form von Breiten- und Längengraden (B, L), sowie die ellipsoidische Höhe h des Uhuru Peaks fest. Höhenangaben H beziehen sich allerdings nicht wie die ellipsoidischen GPS-Höhen h auf das Ellipsoid WGS-84, sondern es wird immer die Höhe über dem Geoid – einer Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes – angegeben (Abb. 5). Unter der festen Erde entspricht das Geoid als äquipotentiale Fläche des Schwerefeldes der unterirdischen Fortsetzung des Meeresspiegels, also jener Fläche, als die sich der Meeresspiegel (Meereshöhe $H = 0$) bei Wasserdurchlässigkeit einstellen würde.

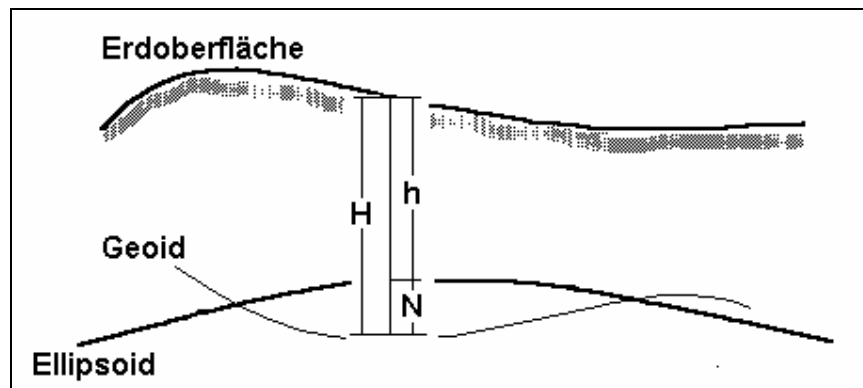


Abb. 5

Das vorwiegend satellitengestützt bestimmte EGM96 stellt das momentan beste zusammenhängende weltweit modellierte Geoid und ist unter der Webseite des CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System

<http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/egm96/egm96.html>

erhältlich.

Die Eingabe der geographischen Koordinaten erlaubt den Zugriff auf die Geoidhöhe $N(B, L)$, welche der Abstand zwischen Ellipsoid und Geoid ist. N muß nun von h subtrahiert werden um die orthometrische Höhe auf dem Geoid zu berechnen.

$$H = h - N(B, L)$$

3. Die vorläufigen Ergebnisse (Stand Oktober 1999)

Punkt	h [m]	N [m]	H [m]
Moshi	827,739	-17,075	844,814
Himo	869,553	-18,267	887,820
Marangu	1867,285	-17,469	1884,754
Mandara Juu	2827,849	-17,258	2845,107
Horombo	3683,359	-16,783	3770,142
Kibo Hut	4682,920	-16,426	4699,346
Gillman's Point	5691,290	-16,324	5707,614
Uhuru Peak	5875,497	-16,273	5891,770 → 5892

Es ist zu betonen, daß die obig tabellierten - und noch in Tansania berechneten - Ergebnisse vorläufigen Charakter haben. Die tatsächliche Genauigkeit der ellipsoidischen GPS-Höhen h dürfte im Dezimeterbereich oder etwas besser liegen, da bei der ad hoc Auswertung der GPS-Messungen vor Ort über den Zeitraum von zwei Tagen aus Zeitgründen keine Feinmodellierung, insbesondere des bei großen Höhenunterschieden wirksamen atmosphärischen Einflusses der Troposphäre stattfinden konnte.

Ferner muß die Genauigkeit der aus der EGM96-Datenbank entnommenen Geoidhöhen $N(B, L)$ im weiteren noch eruiert bzw. statistisch bewertet werden. Sie bewegt sich nach Angaben der für die Berechnung des EGM96 verantwortlichen NASA für den afrikanischen Bereich in der Genauigkeitsklasse von ca. 0.5-1.5 Meter. Daher erfolgt die Angabe der obigen im ITRF-bezogenen Welthöhendatum bezogenen (Meeres-)Höhenangaben H derzeit nur unter Rundung auf den vollen Meter.

Die präzisen Auswertungen und Analysen, und damit die Berechnung der Koordinaten (B, L, h) sowie der Höhen $H = h - N(B, L)$ der obigen, sowie weiterer mit GPS beobachteter Punkte, wird gegenwärtig im Rahmen der Diplomarbeit des Verfassers dieses Beitrages am Studiengang Vermessungswesen der Fachhochschule Karlsruhe durchgeführt.

4. Die endgültigen Ergebnisse

Da die im letzten Kapitel erwähnte Diplomarbeit nun schon seit einigen Wochen läuft und parallel dazu eine Auswertung von der Studentin Tanja Rang an der Universität Karlsruhe durchgeführt wurde stehen die endgültigen Ergebnisse fest. Die zwei Lösungen wurden mit Hilfe des arithmetischen Mittels zusammengefaßt.

Punkt		Fachhochschule Karlsruhe	Universität Karlsruhe	arithmetisches Mittel
Moshi	X	5062839.7866	5062839.7432	5062839.7649
	Y	3862775.2441	3862775.2242	3862775.2342
	Z	-369986.6642	-369986.6578	-369986.6610
	B	-3.3474752	-3.3474752	-3.3474752
	L	37.3424048	37.3424049	37.3424049
	h	827.7963	827.7495	827.7729
	H	844.8713	844.8245	844.8479
Himo	X	5047541.7524	5047541.7513	5047541.7519
	Y	3882440.3988	3882440.3640	3882440.3814
	Z	-373846.8891	-373846.8934	-373846.8913
	B	-3.3824181	-3.3824181	-3.3824181
	L	37.5665665	37.5665662	37.5665664
	h	869.5435	869.5217	869.5326
	H	887.8105	887.7887	887.7996
Marangu 2	X	5052569.8658	5052569.8572	5052569.8615
	Y	3879023.7065	3879023.6998	3879023.7032
	Z	-358194.1800	-358194.1859	-358194.1830
	B	-3.2401364	-3.2401365	-3.2401365
	L	37.5146323	37.5146324	37.5146324
	h	1867.3089	1867.2746	1867.2918
	H	1884.7779	1884.7436	1884.7608
Mandara Juu	X	5053819.6733		5053819.6733
	Y	3879603.7124		3879603.7124
	Z	-351372.0786		-351372.0786
	B	-3.1778805		-3.1778805
	L	37.5119253		37.5119253
	h	2827.8405		2827.8405
	H	2845.0985		2845.0985
Mandara Hut	X	5053591.0405		5053591.0405
	Y	3879632.6088		3879632.6088
	Z	-351779.2818		-351779.2818
	B	-3.1816379		-3.1816379
	L	37.5133835		37.5133835
	h	2686.9199		2686.9199
	H	2704.1959		2704.1959

Horombo 1	X	5059620.6908	5059620.6818	5059620.6863
	Y	3873815.7713	3873815.8054	3873815.7884
	Z	-347287.4520	-347287.4504	-347287.4512
	B	-3.1404775	-3.1404775	-3.1404775
	L	37.4388834	37.4388837	37.4388836
	h	3683.3600	3683.3735	3683.3668
	H	3700.1430	3700.1565	3700.1498
	Horombo Hut	X	5059633.8771	
Y		3873833.1425		3873833.1425
Z		-347181.9441		-347181.9441
B		-3.1395149		-3.1395149
L		37.4389354		37.4389354
h		3698.5793		3698.5793
H		3715.3603		3715.3603
Kibo Hut		X	5064035.1299	5064035.1164
	Y	3870266.3569	3870266.3934	3870266.3752
	Z	-340872.8530	-340872.8529	-340872.8530
	B	-3.0819292	-3.0819294	-3.0819293
	L	37.3894247	37.3894250	37.3894249
	h	4682.9320	4682.9435	4682.9378
	H	4699.3580	4699.3695	4699.3638
	Gillman's Point	X	5066321.9315	5066321.8896
Y		3869002.5234	3869002.5411	3869001.5323
Z		-340127.0866	-340127.0816	-340127.0841
B		-3.0746907	-3.0746907	-3.0746907
L		37.3679185	37.3679189	37.3679187
h		5691.3062	5691.2834	5691.2948
H		5707.6302	5707.6074	5707.6188
Uhuru Peak		X	5067402.6587	5067402.6168
	Y	3867873.7885	3867873.8062	3867873.7974
	Z	-340321.2980	-340321.2930	-340321.2955
	B	-3.0763585	-3.0763585	-3.0763585
	L	37.3539606	37.3539610	37.3539608
	h	5875.5134	5875.4906	5875.5020
	H	5891.7864	5891.7636	5891.7750