

Einleitung und Zielsetzung

Die Satellitengeodäsie ist ein relativ neuer Zweig im Bereich der Vermessung. Mit dem Aufkommen dieser Disziplin und dem Aufbau von Referenzstationsnetzen ist es heute in Deutschland möglich genaue Lagekoordinaten in Echtzeit zu generieren. Damit hat die Satellitenpositionierung die klassische Vermessung revolutioniert und erleichtert in vielen Bereichen die Bestimmung von Lagekoordinaten (z.B. Landesvermessung, Bauwesen). Die hochgenaue Höhenbestimmung erfolgt klassischerweise, sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern, nivellistisch. Denn nur dieses Verfahren garantiert zusammen mit Schweremessungen die angestrebte Genauigkeit im Lokalen von wenigen Zehntel Millimetern und im Globalen von wenigen Zentimetern. Diese Art der Höhenbestimmung ist sehr aufwändig, jedoch alternativlos. Auch im Bereich der Satellitenverfahren gibt es Ansätze und Lösungen, um in Echtzeit – und somit praxistauglich – Höhen zu bestimmen. Hierzu werden die **geometrischen GNSS-Höhen h** und die **physikalischen Gebrauchshöhen H** über die **Undulation $\zeta = h - H$** in Beziehung gesetzt. GNSS-basierte Höhen unterliegen somit anderen Einflussfaktoren als nivellistisch bestimmte Höhen. Mit dieser Bachelorarbeit wurde untersucht, inwieweit GNSS-basierte **Gebrauchshöhenbestimmung in Echtzeit** möglich ist, worin die **Herausforderungen** liegen und welche **Genauigkeiten** möglich sind.

Schwerfeldmodelle

Es wurden verschiedene **globale** und **regionale** Schwerfeldmodelle untersucht und verglichen. Der Vergleich der Modelle (Tab.1, Abb. 1) wurde für die Landesfläche von Baden-Württemberg auf der Grundlage eines 1'x1' Rasters durchgeführt. Die Berechnung fand einheitlich für alle Modelle im Zero-Tide System statt.

Tabelle 1: Statistik der untersuchten Schwerfeldmodelle in [m]

	Mittelwert	Median	Modus	Minimum	Maximum	Range	STD	RMS
GCG2011	48,266	48,272	48,509	46,554	50,158	3,604	0,773	48,272
DFHBF	48,265	48,278	48,498	46,553	50,144	3,591	0,769	48,271
EGG97	48,114	48,158	48,382	46,278	49,985	3,707	0,793	48,121
EGM2008	48,854	48,862	48,603	47,103	50,833	3,730	0,792	48,860
DIRR5	48,899	48,857	48,904	47,251	50,412	3,161	0,727	48,905
GOCO05s	48,864	48,864	49,016	47,040	50,028	2,987	0,712	48,869
TMR5	48,870	48,873	48,701	47,054	50,045	2,991	0,709	48,875

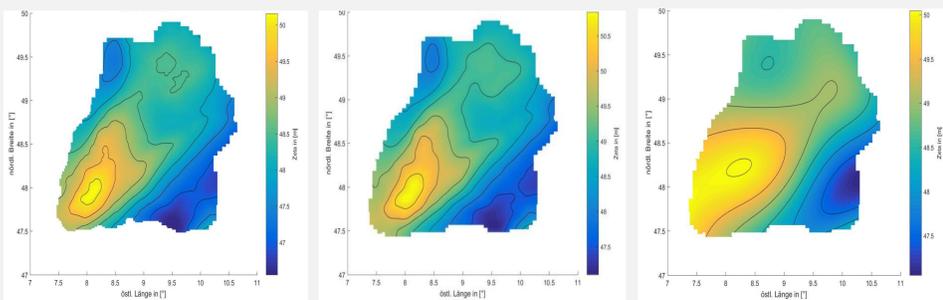


Abbildung 1: Undulation ζ ausgewählter Schwerfeldmodelle; links: GCG2011, Mitte: EGM2008, rechts: TMR5

Generell ist ein Offset von ca. 60 cm zwischen den regionalen und globalen Modellen erkennbar. TMR5 hat die geringste Standardabweichung aufgrund des langwelligen Signalanteils. EGG97 und EGM2008 haben die größten Standardabweichungen aufgrund der hochauflösenden Entwicklung. Dadurch wirken diese Modelle „rauer“. GCG2011 und DFHBF sind sich sehr ähnlich. Bildet man die Differenz zwischen GCG2011 und DFHBF, dann fällt auf, dass es Gebiete gibt in denen sich die Undulation um bis zu +5,7 cm und -2,3 cm unterscheidet.

Testmessungen

Der Messaufbau ist in Abb. 4 dargestellt. Gemessen wurde auf **Geodätischen Grundnetz-Punkten (GGP)** in Baden-Württemberg. Es wurden zwei zeitversetzte Durchgänge mit je neun Einzelmessungen durchgeführt. Nach dieser kurzzeit-statischen Messung (Dauer: 10 s) mit dem Axio-Net Dienst AutoTransGCG2011 wurden die resultierenden Koordinaten mit Soll-Werten verglichen (Abb. 2, Abb. 3).

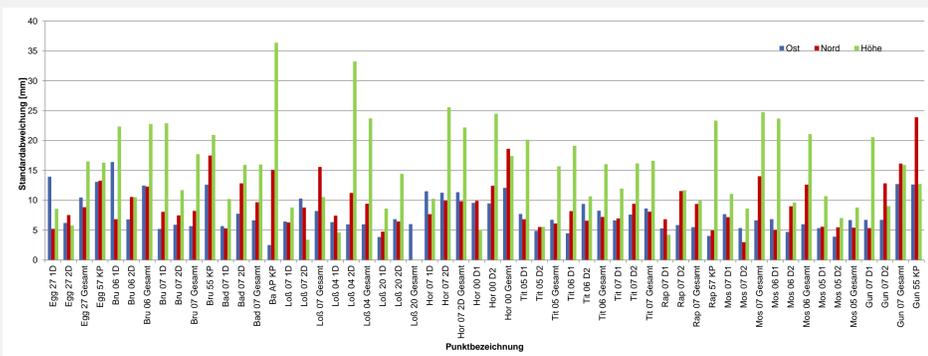


Abbildung 2: Innere Genauigkeit der Testmessungen

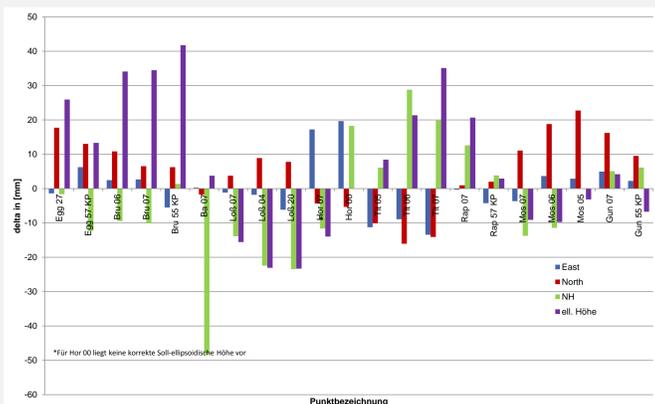


Abbildung 3: Äußere Genauigkeit der Testmessungen



Abbildung 4: Messaufbau

Undulationsprofile

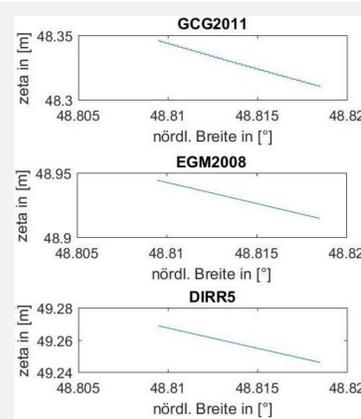


Abbildung 8: Nord-Süd Profil (Baden-Baden)

Die Undulation ζ (zeta) eines Punktes ist bekannt, wenn sowohl seine ellipsoidische als auch seine physikalische Höhe vorliegen. Im Rahmen der Arbeit wurde untersucht, **bis zu welcher Entfernung** diese Undulation auch für andere Punkte (z.B. Versicherungen) in der Umgebung genutzt werden kann.

Es ist festzustellen, dass je nach Profil und Schwerfeldmodell die Undulation schon nach 10 m Entfernung signifikante Änderungen aufweist (Abb. 5, Tab. 2). Ist man bereit Genauigkeitseinbußen von bis zu 4 mm in Kauf zu nehmen, kann die Undulation auch auf 100 m entfernte Punkte extrapoliert werden. Bei noch weiter entfernten Punkten sind entsprechend größere Genauigkeitsverschlechterungen zu erwarten. In der Praxis ist dies situationsbedingt zu entscheiden.

Tabelle 2: Statistik repräsentatives Nord-Süd-Profil (Baden-Baden)

	Anfangspunkt [m]	Endpunkt [m]	Range [mm]	Änderung der Undulation nach					
				10 m [mm]	25 m [mm]	50 m [mm]	100 m [mm]	150 m [mm]	200 m [mm]
GCG2011	48,310	48,346	36	0	1	2	4	6	7
DFHBF	48,314	48,349	35	1	1	2	4	5	7
DIRR5	49,246	49,269	23	0	1	1	2	3	5
EGM2008	48,915	48,944	30	0	1	2	3	4	6
GOCO05s	49,172	49,191	18	0	0	1	2	3	4
TMR5	49,154	49,170	16	0	0	1	2	2	3
EGG97	48,217	48,251	34	0	1	2	3	5	7

Marktrecherche

In Deutschland gibt es verschiedene NRTK-Anbieter (z.B. SAPOS, Axio-Net, VRSnow/Trimble, SmartNet/Leica). Nach den Herstellerangaben sind **keine Genauigkeitsunterschiede** zwischen den Diensten zu erwarten. Außer Axio-Net nutzten zum Zeitpunkt der Durchführung der praktischen Messungen (Sommer 2016) alle Anbieter für die Gebrauchshöhentransformation die Software GZTras. Axio-Net nutzt ein „Transformationsmodul“.

Genauigkeit der Undulation

Mit der Beziehung $\Delta\zeta = \zeta_{\text{soll}} - \zeta_{\text{gem}}$ wurde die Differenz zwischen der Soll-Undulation und der im Rahmen der Arbeit ermittelten Undulation berechnet.

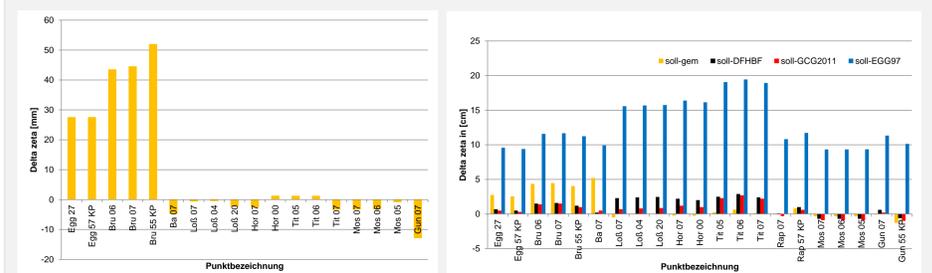


Abbildung 6: Delta Zeta $\Delta\zeta$; links: soll-gem, rechts: verschiedene regionale Modelle

Das linke Diagramm in Abb. 6 liefert überraschende Ergebnisse. Die ersten fünf Testsites entsprechen den Erwartungen. Alle anderen Abweichungen (wenige mm) sind hingegen erstaunlich klein. Ein Grund dafür könnte sein, dass die verwendeten GGP als Beobachtungen in die Berechnung der Höhenbezugsfläche eingeflossen sind. Diese Inhomogenität deutet auf eine Ortsabhängigkeit der Gebrauchshöhenbestimmung hin. Weitere Untersuchungen hierzu sind geplant. Das rechte Diagramm in Abb. 6 zeigt, dass GCG2011 und DFHBF sehr ähnliche Abweichungen aufweisen; mit bis zu 20 cm liefert EGG97 die höchsten Abweichungen der regionalen Modelle.

Genauigkeitsabschätzung für GNSS-basierte Höhen

Die theoretische Genauigkeit einer GNSS-basierten Gebrauchshöhe wurde mit folgender Berechnung abgeschätzt:

$$\sigma_{\text{NHN}} = \sqrt{\sigma_{\text{ell}}^2 + \sigma_{\zeta}^2} \leq \sqrt{(9 \text{ cm})^2 + (3 \text{ cm})^2} \leq 9,49 \text{ cm (99,7 \%)} \text{ bzw. } 3,16 \text{ cm (68,3\%)}$$

Mit den Testmessungen auf den GGP ergaben sich die in Tabelle 3 aufgeführten Genauigkeiten.

Tabelle 3: Gesamtgenauigkeit der Gebrauchshöhe in [cm]

Vertrauensbereich	mittlere innere Genauigkeit	STD der inneren Genauigkeiten	mittlere äußere „Genauigkeit“ (NHN)	STD der äußeren „Genauigkeiten“ (NHN)
68,3% (1 σ)	1,7	0,5	-0,4	2,0
99,7% (3 σ)	5,2	1,4	-1,3	6,0