

Die Bestimmung physikalischer Höhen mit Satelliten



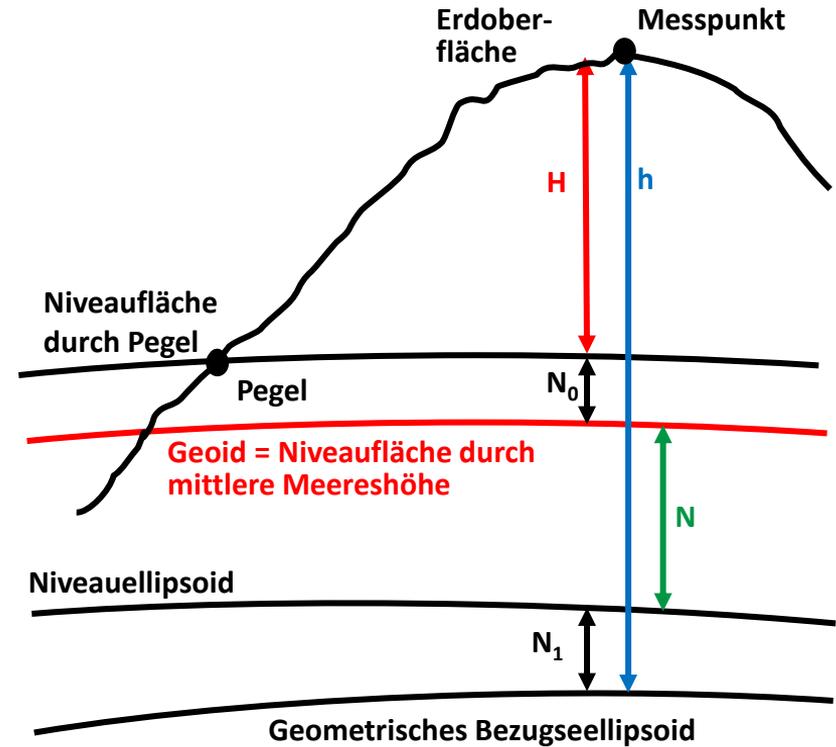
Thomas Gruber

Technische Universität München
Lehrstuhl für Astronomische
und
Physikalische Geodäsie

e-mail
Thomas.Gruber@tum.de

Übersicht

1. Das GNSS-Nivellement
2. Satellitenmethoden, Modelle und Genauigkeiten
 - 2.1 Geometrische Höhen
 - 2.2 Geoidhöhen
3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen
4. Beispiele



Das GNSS-Nivellement

GNSS-Nivellement:

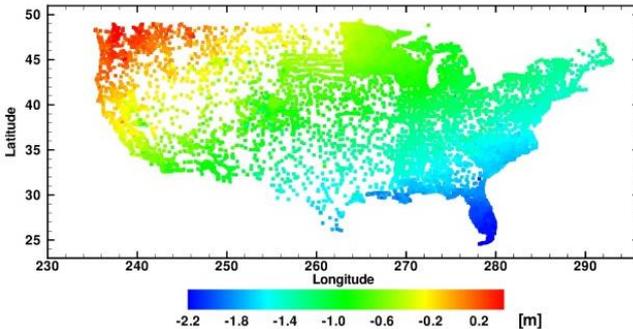
$$H = h - N - N_0 - N_1 \approx h - N$$

Klassisches Nivellement: H_R

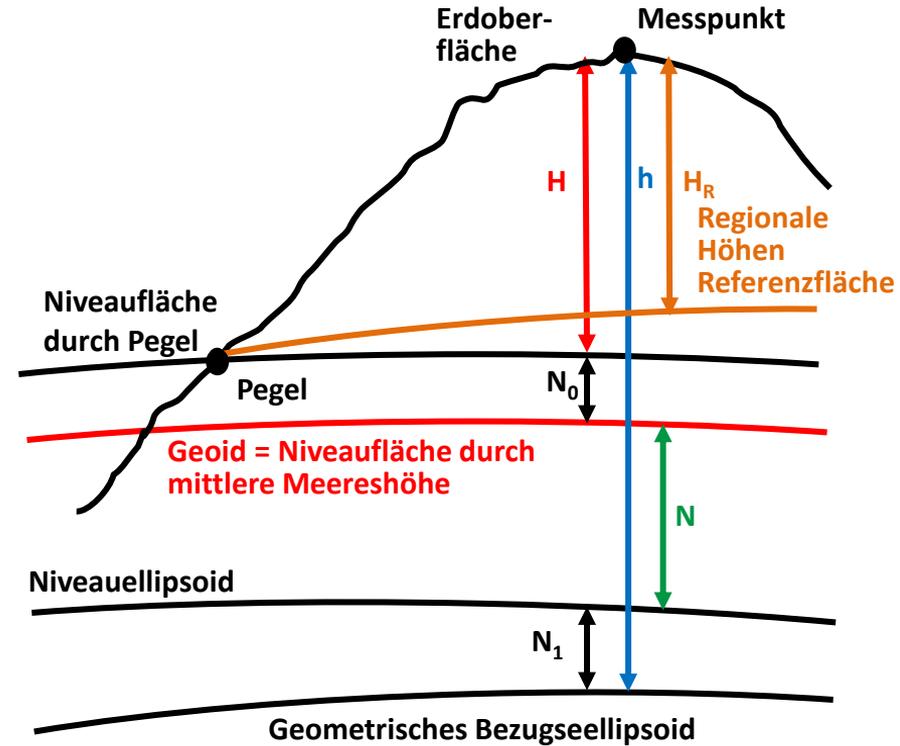
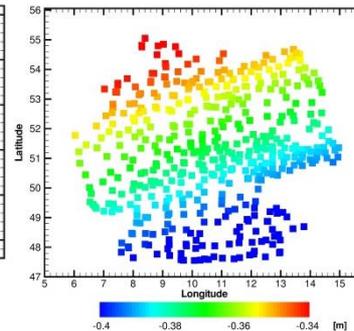
Im Idealfall: $H = H_R$

Differenz aus $N = h - H_R$ und $N = h - H$

USA: NAVD88



D: DHHN2016

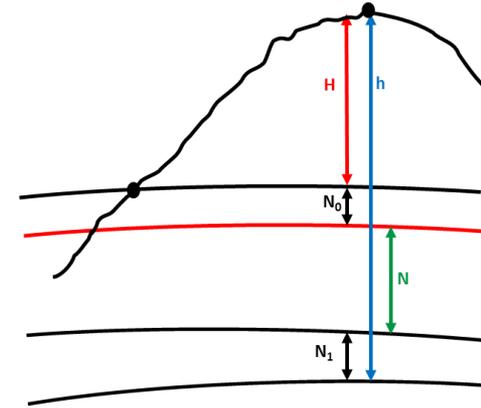


Beobachtung von h mittels absoluter oder relativer 3D-Punktpositionierung mit Satellitennavigationssystemen

- Erzielbare Genauigkeit abhängig von Verfahren, Empfänger und Aufstellzeiten
- Geforderte Genauigkeit von 1 cm erreichbar

Beobachtung von h mittels absoluter oder relativer 3D-Punktpositionierung mit Geodätischem Synthetic Aperture Radar (SAR)*

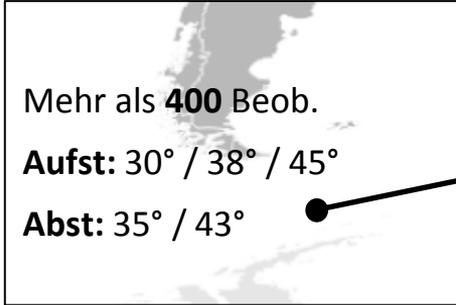
- Beobachtung von Radar Rückstrahlern durch SAR Satelliten (TerraSAR-X, TanDEM-X, Sentinel-1, u.a.)
- Erzielbare Genauigkeit abhängig von Frequenzband (Satellite), Signalstärke (Reflektor) und Beobachtungsgeometrie.



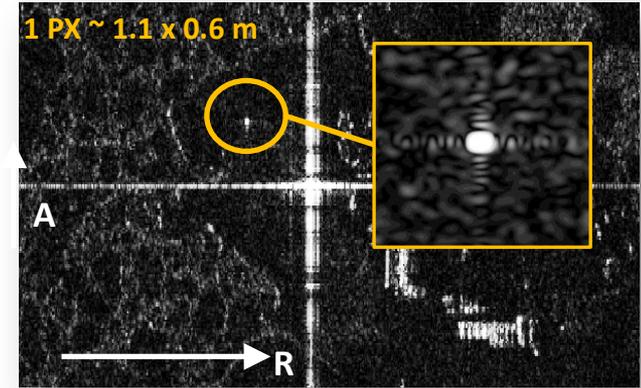
*Gisinger C. et al, 2015: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 53/2015 (4), 1782-1802
Gisinger C. et al, 2017: Journal of Geodesy 91 (1), 2017, 53-67

Satellitenmethoden – Geometrische Höhen – Geodätisches SAR

TerraSAR-X Daten seit 03/2013



2 Tripel-Reflektoren mit bekannten Referenzkoordinaten (< 5 mm)



Radar Zeitmessungen

Entfernung t_R
 Azimuth t_A

Korrekturen

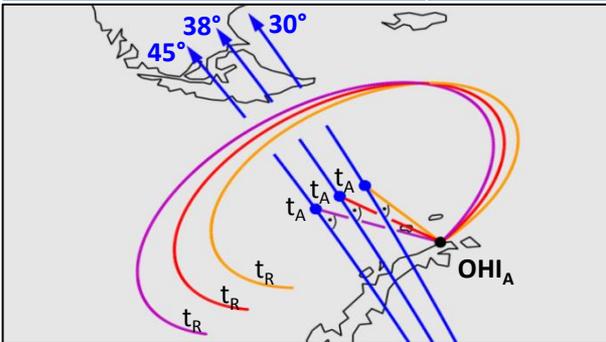
Atmosphäre
 Geodynamik
 Kalibration

3D Lösung

Korrigierte Beob.
 Satellitenbahn

Ergebnis

Koordinaten
 Statistik

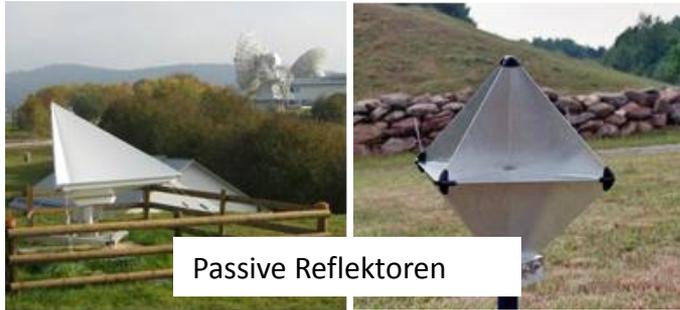


Refl.	Koordinaten		
	ΔN [cm]	ΔE [cm]	ΔU [cm]
OHI _A	-1.5	-1.2	-0.5
OHI _D	-1.4	-1.5	0.3

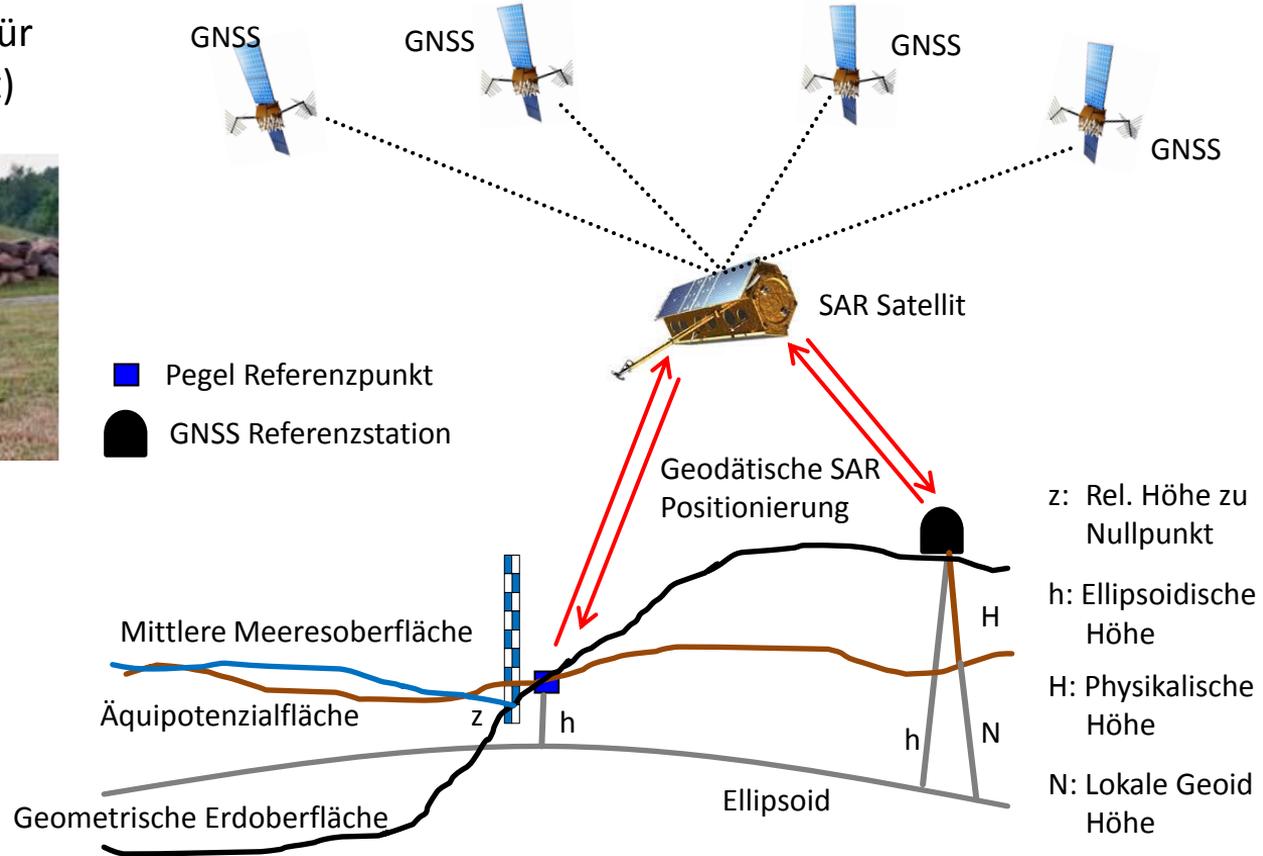
Statistik (95%)		
s_N [±cm]	s_E [±cm]	s_U [±cm]
1.1	1.9	1.6
2.1	4.2	3.7

Satellitenmethoden – Geometrische Höhen – Geodätisches SAR

Geodätische SAR Positionierung für Höhentransfer (SAR-Nivellement)



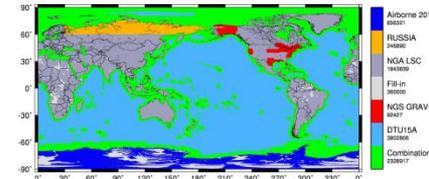
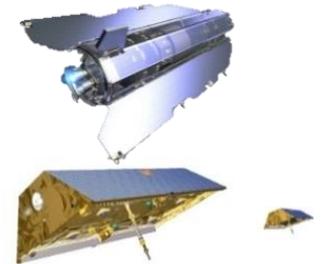
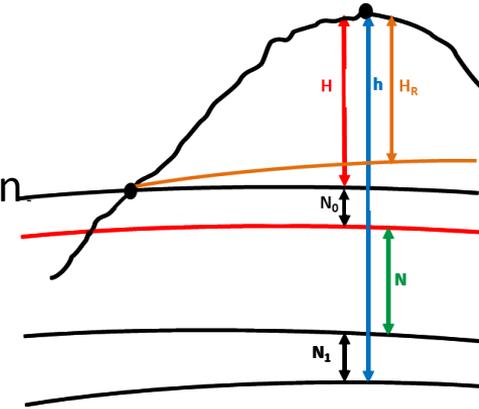
Aktive Transponder



Satellitenmethoden – Modelle - Geoidhöhen

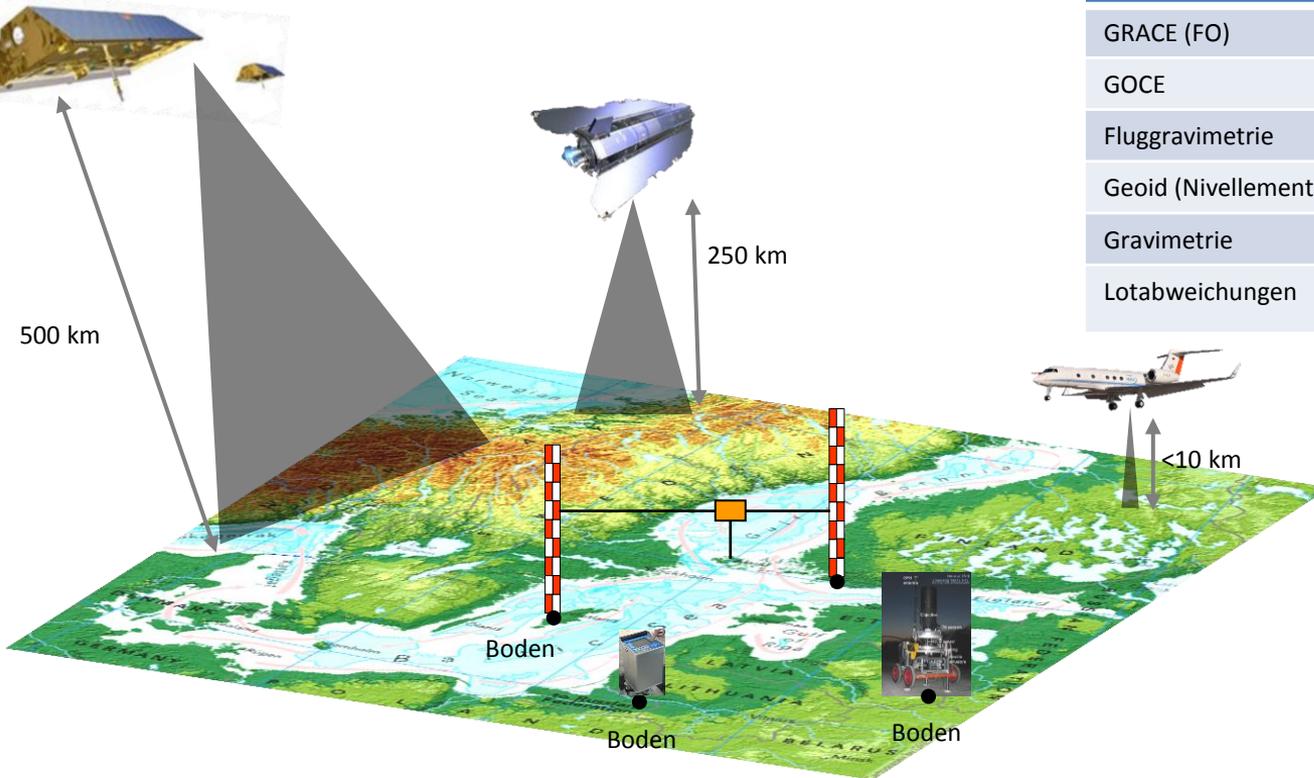
Bestimmung von N mittels globaler Schwerefeldmodelle:

- Erzielbare Genauigkeit und räumliche Auflösung von reinen Satellitenmodellen abhängig von Satellitenbahnen und Meßsystemen
- Mit GRACE und GOCE kann eine geforderte Genauigkeit von 1 cm erreicht werden, aber **mit welcher räumliche Auflösung?**
- Hochauflösende Schwerefeldmodelle enthalten zusätzliche terrestrische und ozeanische Schwereinformation.
- Derartige Modelle erreichen räumliche Auflösungen von ca. 8 km (EGM2008), aber **mit welcher Genauigkeit?**
- Räumliche Auflösung und Genauigkeit sind eng verknüpft und müssen immer gemeinsam betrachtet werden.
- Analyse von beidem durch Vergleiche mit unabhängigen Geoidbeobachtungen, z.b. an GNSS-Nivellement Stationen.

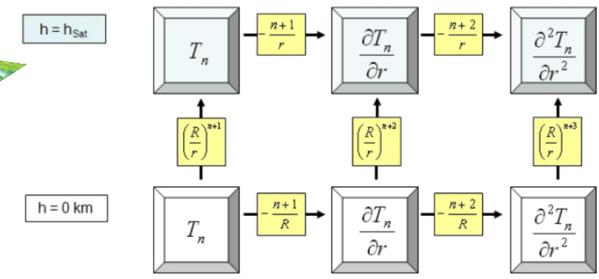


Satellitenmethoden – Modelle - Geoidhöhen

Beobachtungen am Boden vom Flugzeug und mit Satelliten & Integrationsbereich



Beobachtungstyp	Ableitung	Höhe	Auflösung
GRACE (FO)	(1.)	500 km	200 km
GOCE	2.	250 km	80 km
Fluggravimetrie	1.	<10 km	2-5 km
Geoid (Nivellement)	0	Boden	Punkt
Gravimetrie	1.	Boden	Punkt
Lotabweichungen	1.	Boden	Punkt



(nach Rummel, van Gelderen, 1995)

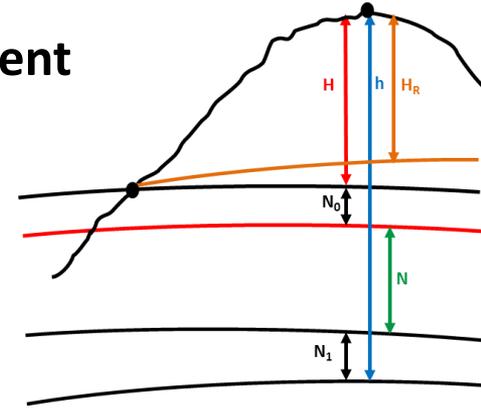
Satellitenmethoden – Modelle - Geoidhöhen

Vergleich der Modelle mit Beobachtungen an GNSS-Nivellement Stationen, dazu Umstellung der Gleichung zu:

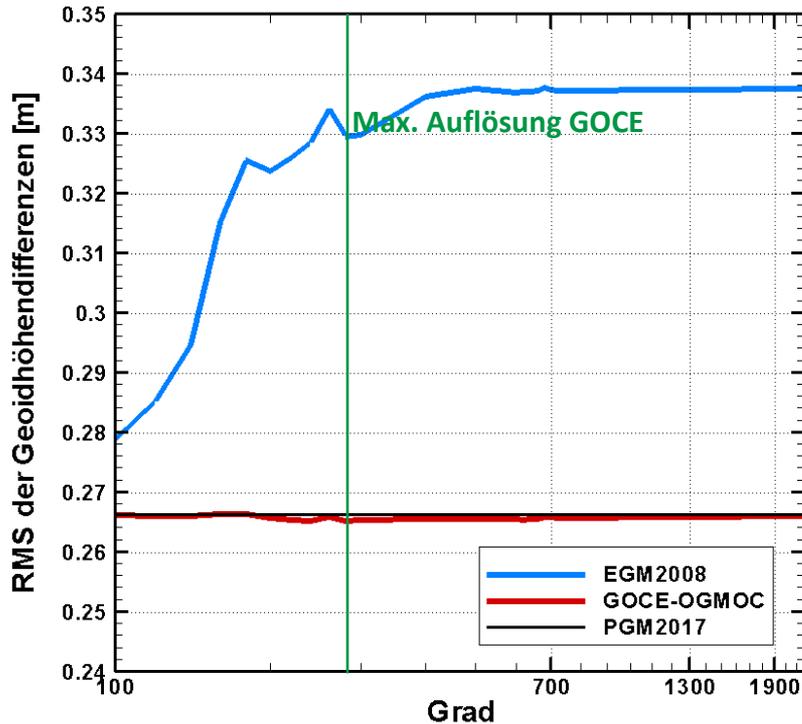
$$\Delta N = h - H_R - N$$

Rechenschritte:

- Transformation Modell auf gemeinsame Standards
- Lösung Kugelfunktionsreihe des Modells für geozentrische Koordinaten
- Berechnung des „Omission Fehlers“ aus Modell und residueller Topographie
- Wenn notwendig Korrektur wegen Geoid-Quasigeoid Separation
- Berechnung der Differenzen ΔN
- Korrektur der Differenzen wegen konstanten Offset und wegen Neigung der lokalen Höhenreferenzfläche durch Schätzung einer ebenen Korrekturfläche
- Statistische Analyse der verbleibenden Geoidhöhendifferenzen



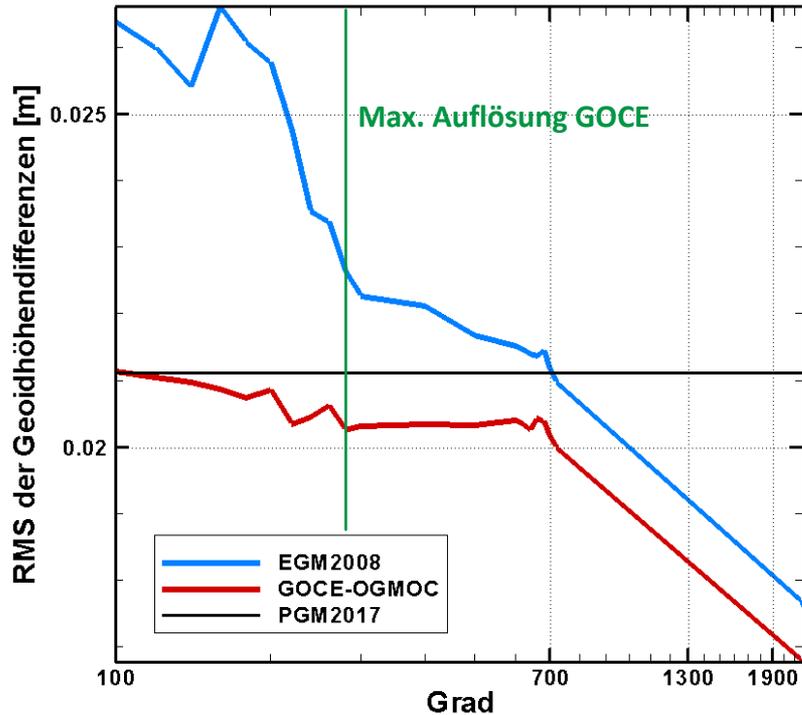
Vergleich mit GNSS-Nivellement Stationen (Brasilien)



Globale Modelle:

- EGM2008: heutiger Standard; keine GOCE Daten; Teildatensatz GRACE; Land/Ozean Gravimetrie.
- PGM2017: Testmodell für Nachfolge EGM2008; komplette GOCE Mission, fast komplette GRACE Mission, z.T. verbesserte Land/Ozean Gravimetrie.
- GOCE-OGMOC: komplette GOCE Mission, fast komplette GRACE Mission, z.T. verbesserte Land/Ozean Gravimetrie.

Vergleich mit DHHN2016 GNSS-Nivellement Stationen (Deutschland)



Deutschland: 470 Punkte des DHHN2016 Datensatzes
(© GeoBasis-DE / Geobasis NRW, 2018).

Globale Modelle:

- EGM2008: heutiger Standard; keine GOCE Daten; Teildatensatz GRACE; Land/Ozean Gravimetrie.
- PGM2017: Testmodell für Nachfolge EGM2008; komplette GOCE Mission, fast komplette GRACE Mission, z.T. verbesserte Land/Ozean Gravimetrie.
- GOCE-OGMOC: komplette GOCE Mission, fast komplette GRACE Mission, z.T. verbesserte Land/Ozean Gravimetrie.

Fehlerabschätzung globales Modell aus DHHN2016 Datensatz (Deutschland)

GNSS-Nivellement Differenzen setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Genauigkeit geom. GPS Höhe: $h \approx 1 \text{ cm}$
- Genauigkeit Nivellement: $H_R \approx 1 \text{ cm}$
- Genauigkeit „Omission Fehler“: $N_{OF} \approx 1 \text{ cm}$
- Gesamtgenauigkeit (FFG): $N_{GNSS-Niv} \approx 1.7 \text{ cm}$

Differenz Modell zu GNSS-Nivellement für GOCE Auflösung ca. **2.1 cm (RMS)**

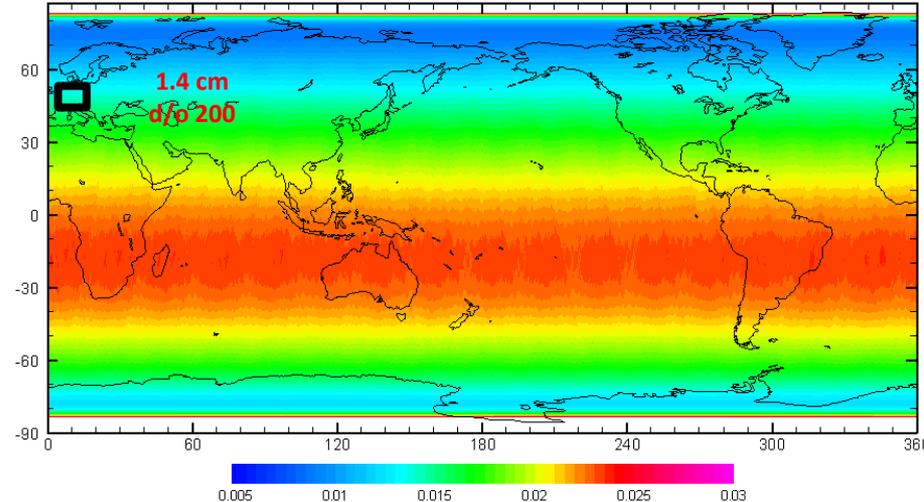
GOCE Geoid Fehler ergibt sich dann durch Umkehrung FFG zu: $N_{GOCE} \approx 1.2 \text{ cm}$

1.4 to 1.5 cm, konsistent zu Geoid Fehlerkarte

$$N_{GNSS-Niv} = h - H_R ; N_{GOCE} = N - N_{OF}$$

$$\Delta N = h - H_R - (N - N_{OF})$$

Fehlerfortpflanzung volle GOCE (TIM5) Varianz-Kovarianzmatrix zu Geoidhöhen (bis Grad 200)



Zusammenfassung & Schlussfolgerungen

- Die Bestimmung physikalischer Höhen durch klassisches Nivellement wird in Zukunft durch das GNSS-Nivellement auf Basis von Satellitendaten ersetzt werden.
- Geometrische Höhen werden mit GNSS bestimmt. Ein vielversprechendes neues Verfahren ist die SAR Positionierung (insb. für Langzeitüberwachung von Punkten).
- Für das GNSS-Nivellement ist die genaue Kenntnis des Geoides erforderlich.
- Das Geoid wird entweder durch ein präzises regionales Modell, oder falls nicht vorhanden durch ein globales zu großen Teilen mit Satelliten bestimmtes Modell repräsentiert. Damit wird Höhenübertragung über lange Distanzen sehr genau möglich werden.
- Das GOCE Geoid erreicht im Abdeckungsbereich zwischen $\pm 83,5$ Grad Breite eine Genauigkeit von 1,5 cm oder besser mit einer räumlichen Auflösung von ca. 80 km
- Durch Kombination mit verfügbarer Land/Ozean Gravimetrie können je nach Datenqualität Modellgenauigkeiten zwischen 1 cm und wenigen Dezimetern erreicht werden (auch in sehr schlecht beobachteten Regionen).

Beispiel – Mount Everest



Lösung Kugelfunktionsreihe in Höhe (**h**) mit voller Auflösung ergibt Höhenanomalie nach Theorie von Molodenskii (**N**)

Berechnung der Normalhöhe (physikalische Höhe) aus: **H** = **h** – (**N** + **N_{OF}**) (mit Omission Fehler)

	GNSS Höhe	Höhenanomalie (Geoid)	Höhe über Meeresspiegel
Mount Everest	h = 8821.47 m Mittel aus GPS und klassischer Technik für Schnee-Oberfläche ¹⁾	N_{EGM2008} = -26.84 m	H_{EGM2008} = 8848.31 m
		N_{PGM2017} = -26.45 m	H_{PGM2017} = 8847.92 m
		N_{GOCE-OGMOC} = -26.43 m	H_{GOCE-OGMOC} = 8847.90 m
		N_{EGM2008/Rapp}²⁾ = -28.32 m	H_{EGM/Rapp} = 8849.79 m
		N_{lokales Geoid}¹⁾ = -26.46 m	H_{lokales Geoid} = 8847.93 m

¹⁾ Chen, J. et al, 2006, Science in China; doi: 10.1007/s11430-006-0531-1

²⁾ Berechnung mit EGM2008 Software: Lösung für h=0 und Korrektur Quasigeoid/Geoid Separation -6.11 m (nach Rapp, 1997)

Beispiel – Kilimanjaro



Lösung Kugelfunktionsreihe in Höhe (**h**) mit voller Auflösung ergibt Höhenanomalie nach Theorie von Molodenskii (**N**)

Berechnung der Normalhöhe (physikalische Höhe) aus: $H = h - (N + N_{OF})$ (mit Omission Fehler)

	GNSS Höhe	Höhenanomalie (Geoid)	Höhe über Meeresspiegel
Uhuru Peak Kilimanjaro	h = 5875.43 m	$N_{EGM2008} = -14.65 \text{ m}$	$H_{EGM2008} = 5890.08 \text{ m}$
		$N_{PGM2017} = -14.66 \text{ m}$	$H_{PGM2017} = 5890.09 \text{ m}$
		$N_{GOCE-OGMOC} = -14.66 \text{ m}$	$H_{GOCE-OGMOC} = 5890.09 \text{ m}$
		$N_{EGM2008/Rapp}^{2)} = -14.73 \text{ m}$	$H_{EGM/Rapp} = 5890.16 \text{ m}$
		$N_{\text{lokales Geoid}}^{1)} = -14.08 \text{ m}$	$H_{\text{lokales Geoid}} = 5889.51 \text{ m}$
	KILI2008 Survey Gipsy ¹⁾		

¹⁾ Team KILI2008, FIG Working Week, 2009, Eilat, Israel 3-8 May 2009

²⁾ Berechnung mit EGM2008 Software: Lösung für h=0 und Korrektur Quasigeoid/Geoid Separation -1.32 m (nach Rapp, 1997)

Beispiel – Aconcagua



Lösung Kugelfunktionsreihe in Höhe (**h**) mit voller Auflösung ergibt Höhenanomalie nach Theorie von Molodenskii (**N**)

Berechnung der Normalhöhe (physikalische Höhe) aus: **H** = **h** – (**N** + **N_{OF}**) (mit Omission Fehler)

	GNSS Höhe	Höhenanomalie (Geoid)	Höhe über Meeresspiegel
Aconcagua	h = 6995.10 m¹⁾	N_{EGM2008} = 34.81 m	H_{EGM2008} = 6960.29 m
		N_{PGM2017} = 33.67 m	H_{PGM2017} = 6961.43 m
		N_{GOCE-OGMOC} = 33.65 m	H_{GOCE-OGMOC} = 6961.45 m
		N_{EGM2008/Rapp}²⁾ = 34.45 m	H_{EGM/Rapp} = 6960.65 m
		N_{lokales Geoid}¹⁾ = 34.67 m	H_{lokales Geoid} = 6960.43 m

¹⁾ Pacino et-al (ed.), Gravity, Geoid and Height Systems, IAGeodesy Symposia 141, DOI 10.1007/978-3-319-10837-7_23, Springer

²⁾ Berechnung mit EGM2008 Software: Lösung für h=0 und Korrektur Quasigeoid/Geoid Separation -3.18 m (nach Rapp, 1997)

Beispiel – Nevado Coropuna



Lösung Kugelfunktionsreihe in Höhe (**h**) mit voller Auflösung ergibt Höhenanomalie nach Theorie von Molodenskii (**N**)

Berechnung der Normalhöhe (physikalische Höhe) aus: $H = h - (N + N_{OF})$ (mit Omission Fehler)

	GNSS Höhe	Höhenanomalie (Geoid)	Höhe über Meeresspiegel
Nevado Coropuna	$h = 6425 \text{ m}^{1)}$	$N_{\text{EGM2008}} = 42.85 \text{ m}$ $N_{\text{PGM2017}} = 42.35 \text{ m}$ $N_{\text{GOCE-OGMOC}} = 42.42 \text{ m}$ $N_{\text{EGM2008/Rapp}}^{2)} = 41.68 \text{ m}$ $N_{\text{lokales Geoid}} = ?$	$H_{\text{EGM2008}} = 6382.15 \text{ m}$ $H_{\text{PGM2017}} = 6382.65 \text{ m}$ $H_{\text{GOCE-OGMOC}} = 6382.58 \text{ m}$ $H_{\text{EGM/Rapp}} = 6383.32 \text{ m}$ $H_{\text{lokales Geoid}} = ?$

¹⁾ Wikipedia (Höhentyp nicht angegeben)

²⁾ Berechnung mit EGM2008 Software: Lösung für $h=0$ und Korrektur Quasigeoid/Geoid Separation -3.82 m (nach Rapp, 1997)

Beispiel – Zugspitze



Lösung Kugelfunktionsreihe in Höhe (**h**) mit voller Auflösung ergibt Höhenanomalie nach Theorie von Molodenskii (**N**)

Berechnung der Normalhöhe (physikalische Höhe) aus: **H** = **h** – (**N** + **N_{OF}**) (mit Omission Fehler)

	GNSS Höhe	Höhenanomalie (Geoid)	Höhe über Meeresspiegel
Zugspitze	h = 3010.93 m¹⁾	N_{EGM2008} = 49.12 m	H_{EGM2008} = 2961.81 m
		N_{PGM2017} = 49.10 m	H_{PGM2017} = 2961.83 m
		N_{GOCE-OGMOC} = 49.08 m	H_{GOCE-OGMOC} = 2961.85 m
		N_{EGM2008/Rapp}²⁾ = 49.56 m	H_{EGM/Rapp} = 2961.29 m
		N_{lokales Geoid} = 49.46 m	H_{lokales Geoid} = 2961.47 m¹⁾

¹⁾ Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern;

³⁾ <http://www.2962m.de/> H=2962.06 m

²⁾ Berechnung mit EGM2008 Software: Lösung für h=0 und Korrektur Quasigeoid/Geoid Separation -0.34 m (nach Rapp, 1997)

Beispiel – Großglockner



Lösung Kugelfunktionsreihe in Höhe (**h**) mit voller Auflösung ergibt Höhenanomalie nach Theorie von Molodenskii (**N**)

Berechnung der Normalhöhe (physikalische Höhe) aus: **H** = **h** – (**N** + **N_{OF}**) (mit Omission Fehler)

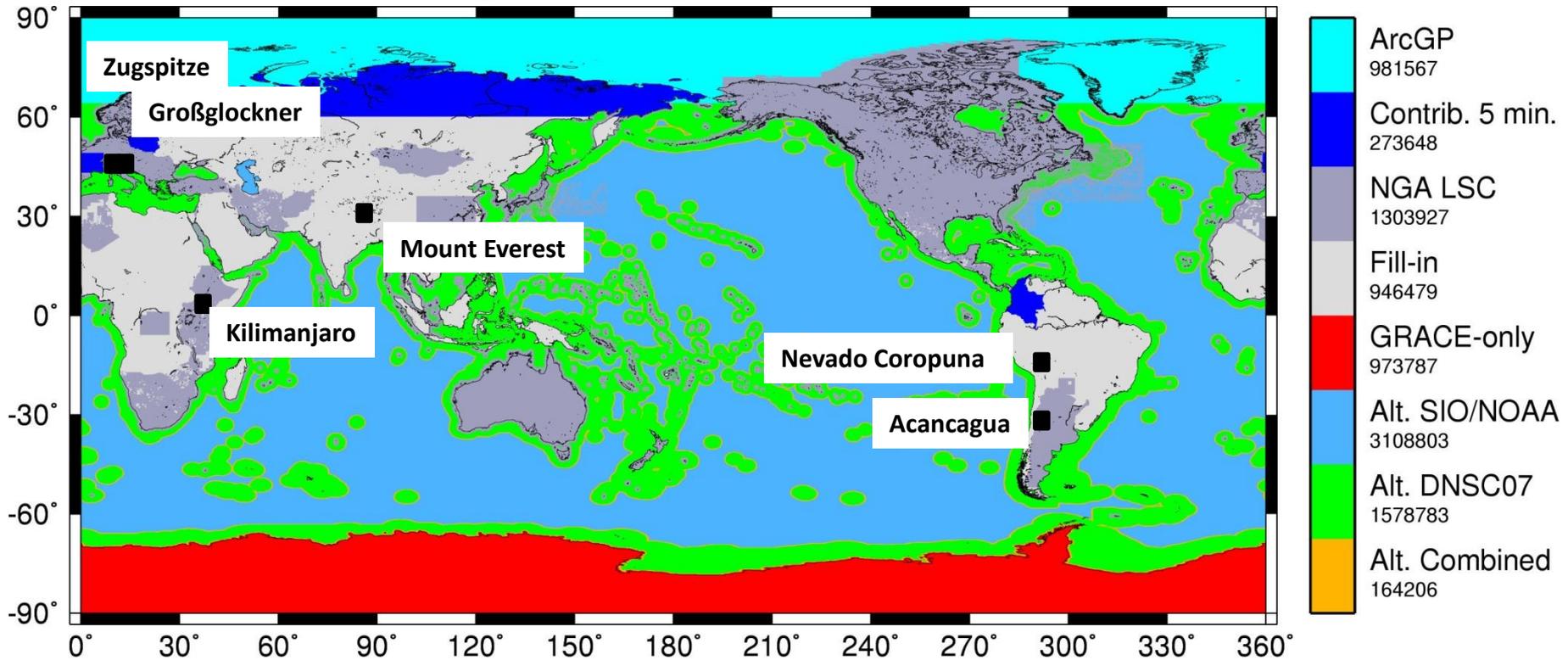
	GNSS Höhe	Höhenanomalie (Geoid)	Höhe über Meeresspiegel
Großglockner	h = 3851,38 m	N_{EGM2008} = 50.49 m	H_{EGM2008} = 3800.89 m
		N_{PGM2017} = 50.47 m	H_{PGM2017} = 3800.91m
		N_{GOCE-OGMOC} = 50.48 m	H_{GOCE-OGMOC} = 3800.90 m
		N_{EGM2008/Rapp}²⁾ = 50.77 m	H_{EGM/Rapp} = 3800.61 m
		N_{lokales Geoid} = 50.59 m³⁾	H_{lokales Geoid} = 3800.79 m¹⁾

¹⁾ BEV Mitteilung 15.9.2017 – Höhe des Gipfelkreuzes über Adria - ³⁾ BEV Österreichisches Geoid GRS80

²⁾ Berechnung mit EGM2008 Software: Lösung für h=0 und Korrektur Quasigeoid/Geoid Separation -0.92 m (nach Rapp, 1997)

Datenverfügbarkeit EGM2008

5'x5' Datenüberdeckung



Quelle: Nikolaos K. Pavlis, Simon A. Holmes, Steve C. Kenyon, and John K. Factor: An Earth Gravitational Model to Degree 2160 EGM2008

Datenverfügbarkeit PGM2017 / GOCE-OGMOC

5'x5' Datenüberdeckung

