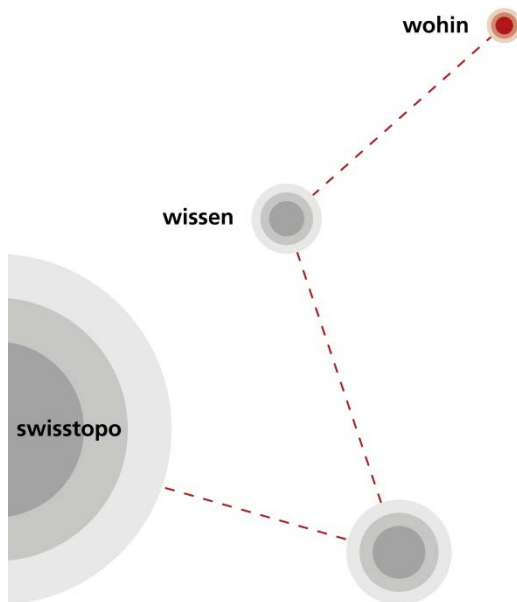


# Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95'

## Teil 14



Das Geoid der Schweiz 2004 „CHGeo2004“

Urs Marti



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Landestopografie swisstopo  
Office fédéral de topographie swisstopo  
Ufficio federale di topografia swisstopo  
Uffizi federal da topografia swisstopo  
Federal Office of Topography swisstopo

[www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch)





Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Verteidigung,  
Bevölkerungsschutz und Sport VBS

**Bundesamt für Landestopografie swisstopo**

## **Aufbau der neuen Landes- vermessung der Schweiz 'LV95'**

**Doku 22  
2016**

Urs Marti

**Teil 14:  
Das Geoid der Schweiz 2004 „CHGeo2004“**

2016

© 2016 **swisstopo**  
Bundesamt für Landestopographie  
Office fédéral de topographie  
Ufficio federale di topografia  
Uffizi federal da topografia  
Federal Office of Topography  
Seftigenstrasse 264  
3084 Wabern

Redaktion: A. Wiget  
Seftigenstrasse 264  
CH-3084 Wabern  
Tel: +41 31 963 24 69  
Fax: +41 31 963 24 59  
E-mail: [adrian.wiget@swisstopo.ch](mailto:adrian.wiget@swisstopo.ch)

**ISBN 978-3-302-10005-0**

---

**swisstopo Doku** ist die Nachfolgeserie der Reihe "Berichte aus der L+T" in welcher über die wichtigen Arbeiten aus den Bereichen von swisstopo berichtet wird.

**swisstopo Doku** est la suite de la série "Berichte aus der L+T", qui décrivent les projets et activités les plus importants de swisstopo.

**swisstopo Doku** is the follow-up of the series "Berichte aus der L+T" in which important projects and activities of swisstopo are described.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Berechnung von CHGeo98	1
1.2	Motivation für eine Neuberechnung	1
<b>2</b>	<b>Die verwendeten Messungen</b>	<b>3</b>
2.1	Astrogeodätische Messungen	3
2.2	GPS/Nivellement-Daten	4
2.2.1	Nivellement	4
2.2.2	GPS	5
2.2.3	GPS/Nivellement	6
2.3	Schweredaten	8
2.4	Synthetische GPS/Nivellement-Punkte im benachbarten Ausland	9
2.5	Übersicht über die verwendeten Daten	9
<b>3</b>	<b>Massenmodelle</b>	<b>11</b>
3.1	Digitales Höhenmodell	11
3.2	Übrige Massenmodelle	14
3.3	Das globale Referenzmodell EGM96	15
<b>4</b>	<b>Reduktion der Beobachtungen</b>	<b>16</b>
4.1	Bemerkung zum Referenzsystem	16
4.2	Reduktion des globalen Modells	16
4.3	Reduktion des Einflusses der Topografie	16
4.4	Einfluss der übrigen Massenmodelle	17
4.5	Reduktion wegen der Residualschwere	17
4.6	Darstellung der Reduktion der Lotabweichungen	18
4.7	Reduktion der GPS/Nivellement-Daten	20
4.8	Reduktion der Schweredaten	22
<b>5</b>	<b>Prädiktion des Co-Geoids</b>	<b>23</b>
5.1	Berechnungsmethode	23
5.2	Variantenrechnungen	23
5.3	Genauigkeit der prädizierten Lösungen	29
5.4	Die gewählte definitive Lösung des Co-Geoids	31
5.5	Die Residuen der Beobachtungen	31
<b>6</b>	<b>Berechnung des Geoids und des Quasigeoids</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Vergleich mit CHGeo98</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Die GPS/Nivellement-Residuen</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Die Höhentransformationsfläche HTRANS</b>	<b>42</b>
9.1	Kurzbeschreibung	42
9.2	CHGeo2004/HTRANS	43
<b>10</b>	<b>Vergleich von CHGeo2004 mit anderen Modellen</b>	<b>44</b>
10.1	Vergleich mit dem europäischen Geoidmodell	44
10.2	Vergleich mit dem globalen Geoidmodell EGM2008	46

<b>11</b>	<b>Berechnungs-Software</b>	<b>49</b>
11.1	Programme für die Berechnung des Geoidmodells	49
11.2	Programme für die Endbenutzer	49
<b>12</b>	<b>Arbeiten nach Abschluss von CHGeo2004</b>	<b>52</b>
12.1	Erweiterung des Perimeters	52
12.2	Zusätzliche GPS/Nivellement-Punkte	52
12.3	Arbeiten für den Gotthard-Basistunnel	53
12.4	Arbeiten am Sustenpass	54
12.5	Geoidbestimmung im Unterengadin	55
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung, Ausblick</b>	<b>56</b>
<b>Referenzen</b>		<b>58</b>
<b>Anhänge</b>		
A1	Zusammenstellung der verwendeten GPS/Nivellement-Punkte	

# 1 Einleitung

## 1.1 Berechnung von CHGeo98

Das nationale Geoidmodell CHGeo98 [Marti, 1997, Marti, 1998 und Marti, 2002a] basierte sehr stark auf astro-geodätischen Lotabweichungsmessungen und wurde durch GPS/Nivellement-Punkte zusätzlich gestützt. Schweremessungen wurden nicht direkt als Beobachtungen verwendet, sondern dienten nur indirekt zur Reduktion der übrigen Messgrössen auf Meereshöhe. Als digitales Geländemodell wurden DHM25 (Level 1) und - im angrenzenden Ausland - DTED (Level 1) verwendet. Als zusätzliche Massenmodelle flossen die Modelle für die Moho, den Ivrea-Körper, Sedimente, Wassermassen der Seen und den Aletschgletscher in die Berechnungen ein. Die Genauigkeit von CHGeo98 wurde mit 3-5 cm über die ganze Schweiz angegeben. Dieses Geoidmodell wurde in Form eines 1-km-Gitters an die Benutzer abgegeben und fand eine grosse Verbreitung unter den GPS-Benutzern in der Schweiz. Zur Berechnung von Lotabweichungen stand das Programm GEOLOT98 zur Verfügung.

Für die Berechnung von CHGeo98 wurden insgesamt 1041 Lotabweichungskomponenten und 72 GPS/Nivellement-Punkte (Höhenanomalien) als Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt.

Ein Problem von CHGeo98 war die damals noch unvollständige Auswertung von LHN95 und dass die GPS-Daten der ursprünglichen LV95-Kampagnen von 1989 bis 1996 verwendet werden mussten. Dies führte zu einer reduzierten Genauigkeit der verwendeten GPS/Nivellement-Daten. Zudem waren diese GPS/Nivellement-Punkte zum Teil recht weit voneinander entfernt, was deren Kontrolle erschwerte.

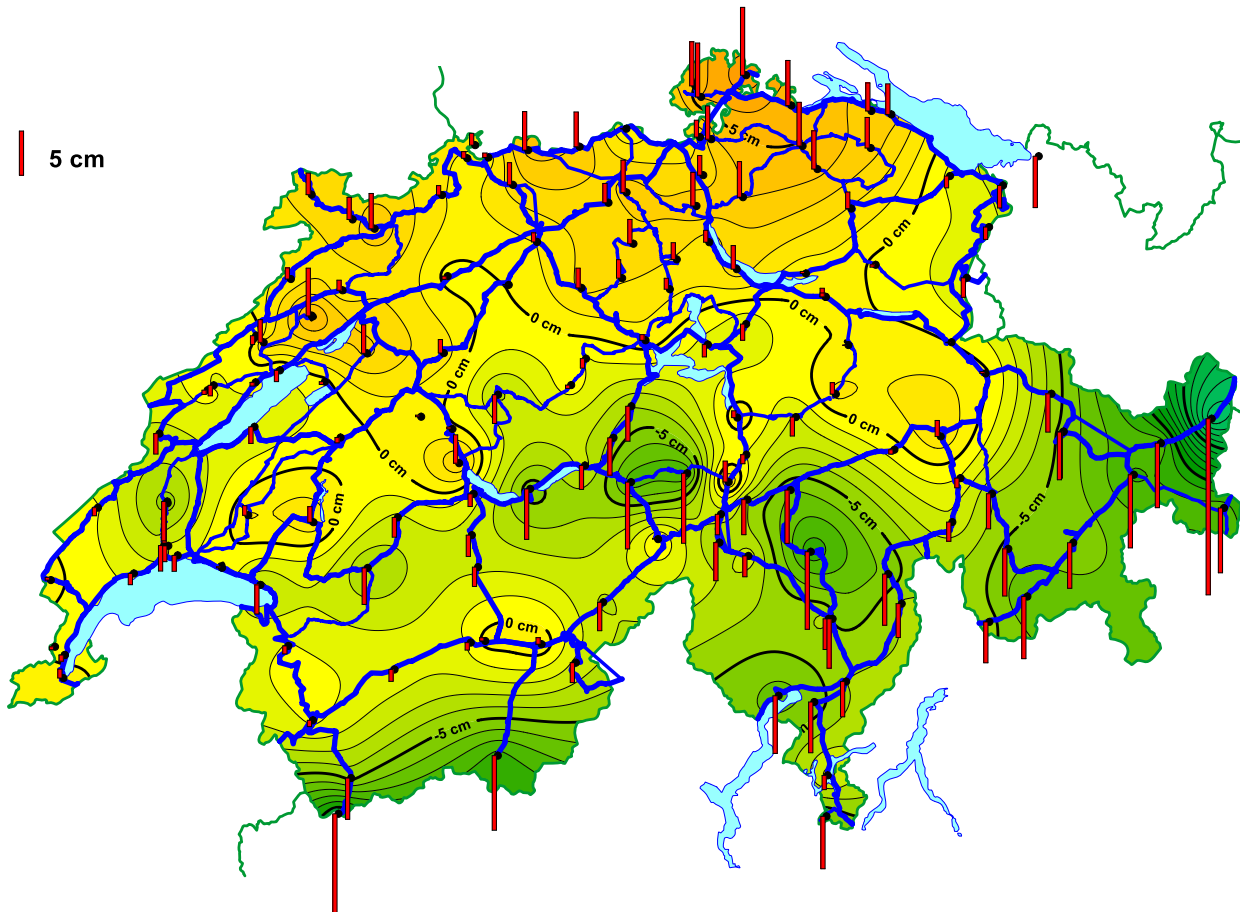
Bei der Berechnung von CHGeo98 wurde kein globales Referenzmodell verwendet, was zu einer etwas zweifelhaften Trendbestimmung bei der Reduktion der Messdaten auf Meereshöhe führte.

## 1.2 Motivation für eine Neuberechnung

Der Hauptgrund für eine Ablösung des Geoidmodells CHGeo98 durch eine revidierte Version CHGeo2004 war die verbleibende Inkonsistenz zwischen den orthometrischen Höhen aus LHN95 (Nivellement und Schwere) und den orthometrischen Höhen aus GPS und CHGeo98. Diese verbleibenden Differenzen (siehe Abbildung 1-1) zeigen einen ziemlich systematischen Verlauf in der Grössenordnung von einigen cm bis maximal 20 cm beim Punkt Ramosch im Unterengadin, der damals als vermeintlicher Ausreisser nicht für die Geoidbestimmung verwendet wurde.

Aufgrund dieses Bildes der Restklaffen wurde entschieden, ein neues Geoidmodell zu berechnen, welches die Konsistenz zwischen GPS (LV95) und Nivellement (LHN95) herstellt [Schneider et al. 2002]. Dies sollte insbesondere durch eine Verdichtung des GPS/Nivellement-Netzes erreicht werden (Swiss Combined Geodetic Network, CH-CGN). Dazu wurde 2003 eine spezielle Anschlusskampagne durchgeführt, bei welcher ca. 40 neue Verknüpfungen zwischen GPS und LHN95 bestimmt werden sollten [Schlatter et al. 2005 und Brockmann 2003]. Diese Punkte wurden so ausgewählt, dass Problemzonen in CHGeo98 (Sustenpass, Unterengadin) und grössere Datenlücken (Graubünden, Wallis) abgedeckt wurden. Zudem sollten insbesondere auch Punkte am Ende offener Nivellementszüge (meist in der Nähe der Landesgrenze) beobachtet werden. Neben dieser speziell für die Geoidbestimmung durchgeführten Kampagne ergaben sich mit der Zeit weitere GPS/Nivellement-Punkte durch den Anschluss von AGNES- und LV95-Stationen an das Landesnivellement [Schlatter et al. 2003], welche ebenfalls für die Geoidbestimmung benutzt werden konnten.

Eine weitere Verbesserung des Geoidmodells sollte durch den Einbezug der Resultate der GPS-Kampagnen CHTRF98 und eventuell bereits CHTRF2004 erreicht werden. Neue, verbesserte orthometrische Höhen waren aus den Resultaten der in der Zwischenzeit verfügbaren Gesamtausgleichung des LHN95 zu erwarten.



**Abbildung 1-1:** GPS-Nivellement-Residuen mit CHGeo98 (Stand 2002)

Zusätzlich zu den neuen GPS-Nivellement-Messungen wurde auch eine Ergänzung der Lotabweichungsmessungen vorgesehen. Dabei konnten mit den beiden neuen digitalen Zenitkameras der ETH Zürich (DIADEM) und der TU Hannover (TZK-2D) innerhalb eines Monats mehr als 60 Stationen mit einer Genauigkeit von ca. 0.1 Bogensekunden beobachtet werden [Marti et al. 2004]. Diese neuen Stationen wurden ebenfalls in Problemzonen von CHGeo98 gelegt und zudem in Regionen, welche bisher nur durch alte Messungen (vor 1980) abgedeckt waren (z.B. Bodensee, Berner Oberland), da vermutet wurde, dass diese alten Messungen die Geoidlösung systematisch verfälschen könnten.

Neben den neuen Messungen sollte eine Verbesserung des Geoidmodells auch durch den Einbezug von Schweredaten, durch die Anwendung der neu verfügbaren digitalen Geländemodelle, durch den Einbezug eines globalen Modells des Erdschwerefeldes (EGM96) und durch die Verbesserung der Berechnungsmethoden erreicht werden.



## 2 Die verwendeten Messungen

### 2.1 Astrogeodätische Messungen

Für die Berechnung von CHGeo2004 wurden alle Messungen verwendet, welche auch in CHGeo98 enthalten waren. Hinzu kamen Lotabweichungen, die im Oktober 2003 mit den digitalen Zenitkameras der ETH Zürich (DIADEM) und der TU Hannover (TZK-2D) bestimmt wurden und einige Punkte im Ausland, welche in CHGeo98 nicht berücksichtigt wurden, da sie ziemlich weit von der Schweizer Grenze entfernt liegen. Eine Übersicht über die vorhandenen Lotabweichungsmessungen ist in der folgenden Abbildung 2-1 gegeben. Die detaillierte Zusammenstellung der neuen Lotabweichungsstationen ist in [Marti et al. 2004) enthalten. Wiederholte Vergleichsmessungen auf identischen Punkten mit beiden Kameras ergaben, dass die Genauigkeit der Lotabweichungen mit den neuen digitalen Kameras in der Grössenordnung von 0.1" liegt. Dies ist gegenüber den klassischen Zenitkameras (Genauigkeit 0.3" - 0.5") eine erhebliche Genauigkeitssteigerung.

Für die Datenaufbereitung wurden zunächst die geodätischen Koordinaten sowohl in LV95 als auch in ETRF93 zusammengestellt. Für die in der Kampagne 2003 gemessenen Punkte wurden keine genauen Höhen bestimmt. In allen Berechnungen wurden die aus dem DHM25 interpolierten Höhen verwendet. Die astronomischen Koordinaten sind in einem separaten File abgespeichert. Die Lotabweichungen wurden aus diesen beiden Dateien mit dem Programm „lotab“ ohne Berücksichtigung der Meridiankonvergenz berechnet.

Alle Lotabweichungen wurden vor der Weiterverarbeitung in ETRS89 transformiert. Als genereller mittlerer Fehler wurde für die klassischen Messungen 0.5", für die analogen Zenitkameradaten 0.3" und für die digitalen Zenitkameradaten 0.1" eingeführt. Jedoch wurden für etliche Stationen individuelle (meist schlechtere) Standardabweichungen eingeführt, wenn dies die Originalauswertungen der Daten anzeigten, oder die Messungen wurden ganz aus den weiteren Berechnungen eliminiert.

Für die Berechnung von CHGeo2004 lagen 697 Lotabweichungsstationen mit total 1275 verwendeten Komponenten vor.

Die ursprüngliche Vermutung, dass eine signifikante systematische Abweichung zwischen den ältesten Messungen und den neueren Zenitkameramessungen besteht, konnte nicht bestätigt werden. Die neuen Messungen fügen sich in der Regel recht gut in die bestehenden ein. Mögliche Ursachen für die vermutete Diskrepanz wären in den unterschiedlichen Sternkatalogen mit unterschiedlichen Bezugssystemen oder in der Berücksichtigung der Polschwankungen zu suchen gewesen.

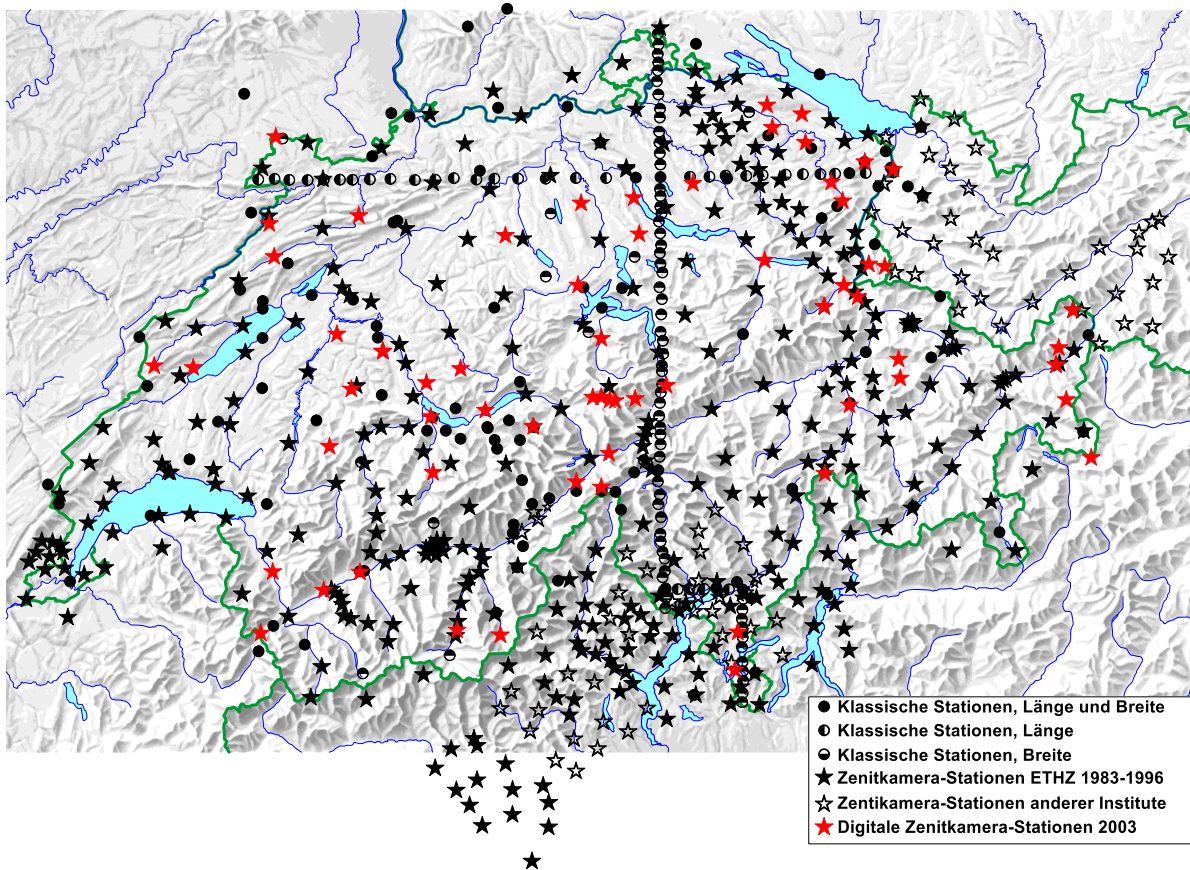


Abbildung 2-1: Lotabweichungen für CHGeo2004 mit den neuen Messungen von 2003 in rot

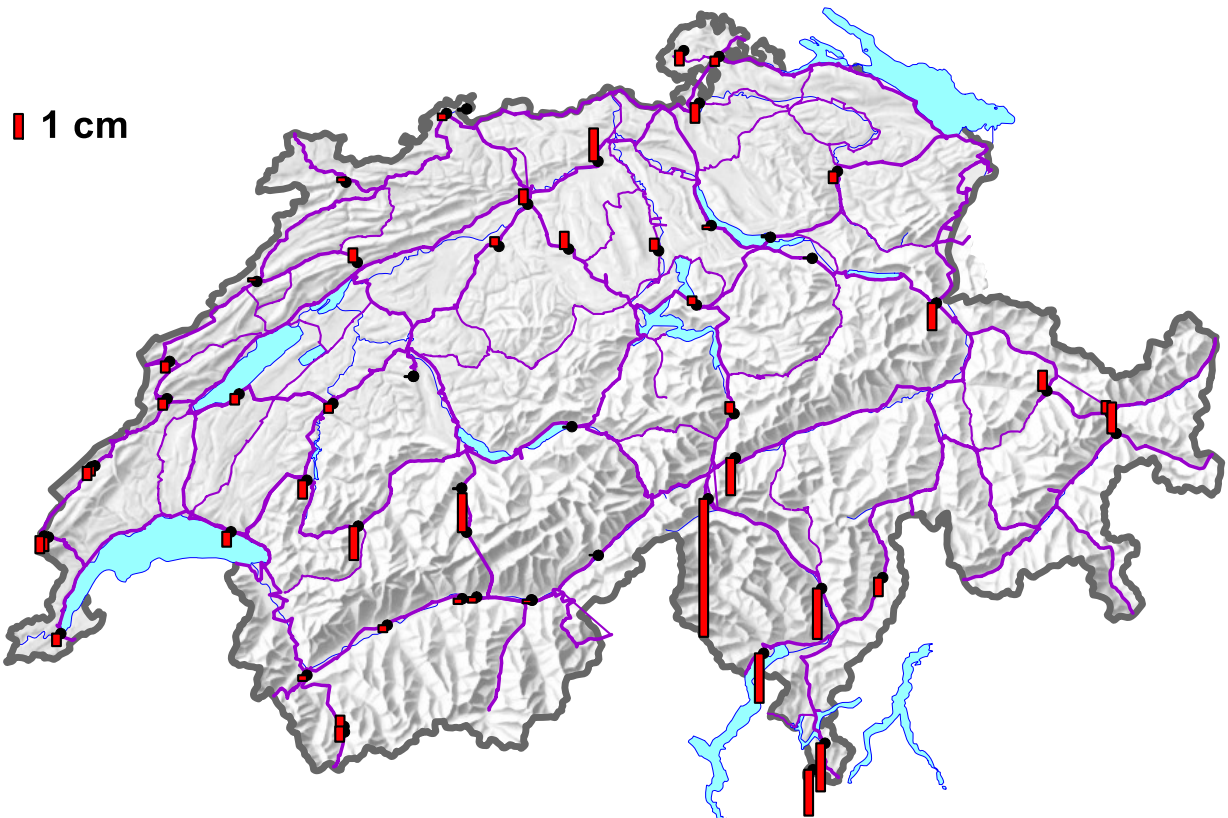
## 2.2 GPS/Nivellement-Daten

In CHGeo98 konnten 72 GPS/Nivellement-Messungen für die Berechnung verwendet werden. Zwar waren schon damals mehr Punkte vorhanden, konnten aber aufgrund des damaligen unvollständigen Standes der Auswertung von LHN95 noch nicht für die Geoidbestimmung berücksichtigt werden. Als Standardabweichung einer GPS/Nivellement-Höhe wurde in der Schlussberechnung von CHGeo98 generell 3 cm eingeführt.

### 2.2.1 Nivellement

Für CHGeo2004 konnte eine erste Gesamtausgleichung des Landeshöhennetzes LHN95 verwendet werden, welche sämtliche Messungen für das Landesnivellement bis und mit 2004 enthielt. Diese als RCM0406 bekannte Lösung bildete danach auch die Grundlage für die definitive Festlegung des LHN95 und bezieht sich auf die Referenzepoche 1993. Dieses ist in [Schlatter, 2007] ausführlich beschrieben. Die Unterschiede der definitiven Lösung LHN95 zu der in CHGeo98 verwendeten provisorischen Ausgleichung ist in der folgenden Abbildung 2-2 dargestellt. Die Differenzen liegen im grössten Teil der Schweiz unterhalb von 1 cm, jedoch zeigen sich in einigen Gebieten systematische Trends (z.B. Tessin). Die grosse Differenz auf dem Gotthardpass ist eine Folge der Senkung des Punktes, welche durch den Bau des Strassentunnels verursacht wurde.

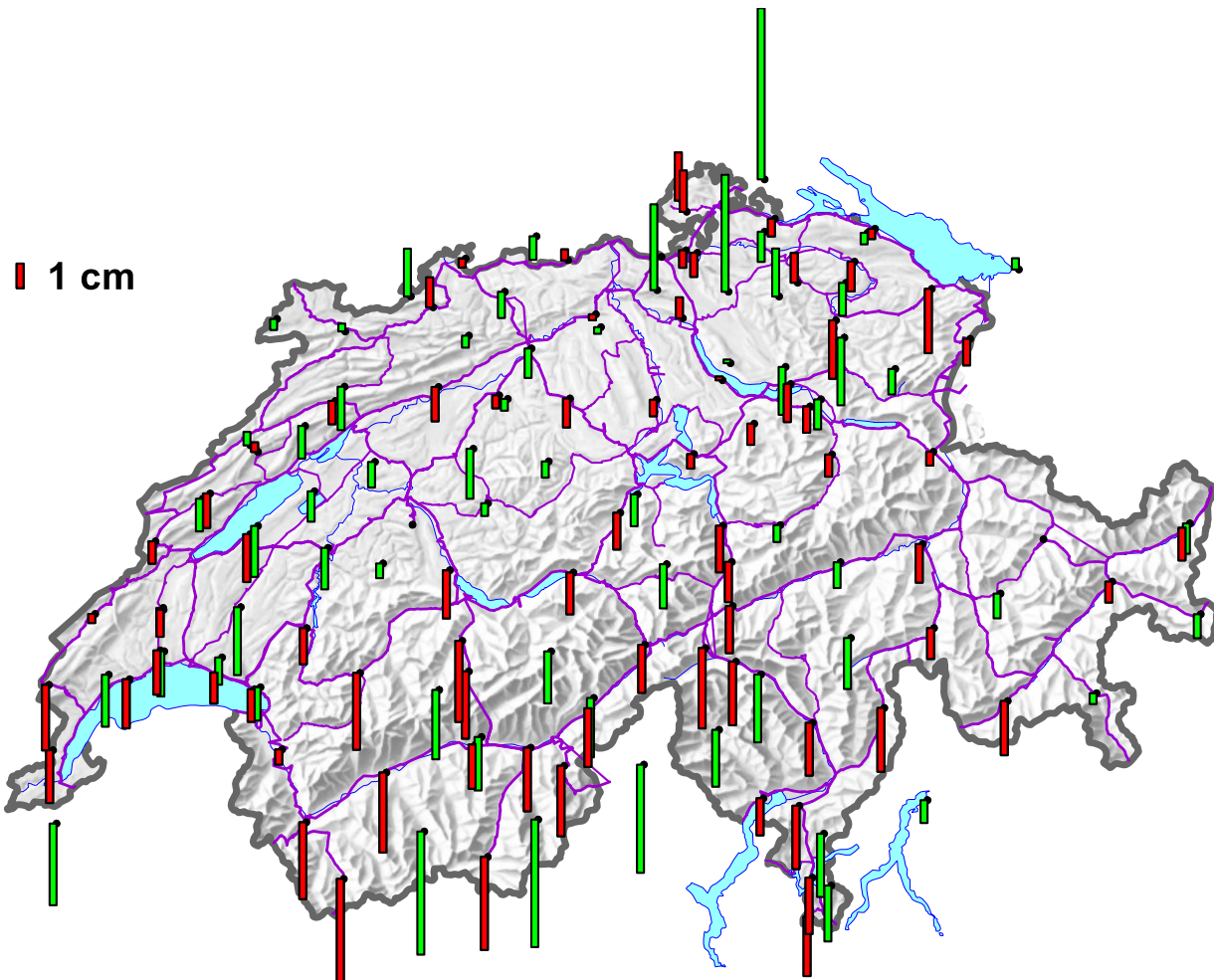
In der Geoidberechnung CHGeo2004 wurde von den ursprünglich in LHN95 berechneten Potentialwerten ausgegangen. Diese wurden danach für die Weiterverarbeitung in Normalhöhen umgerechnet. Dies geschieht, indem man die Potentialwerte durch die mittlere Normalschwere in der Lotlinie dividiert. Da die mittlere Normalschwere wiederum von der Normalhöhe abhängt, hat dies in einem iterativen Prozess mit den Programmen QUAWIRK und POTHÖE zu erfolgen. Drei Iterationen genügen, um strenge Normalhöhen zu erhalten. Für alle Punkte wurden auch orthometrische Höhen berechnet. Diese dienten aber nur zur Kontrolle und für einige Vergleichsrechnungen.



**Abbildung 2-2:** Differenzen der definitiven orthometrischen Höhen LHN95 und der in CHGeo98 verwendeten Lösung (aus [Schlatter 2007]) auf den Stützpunkten für CHGeo98

### 2.2.2 GPS

Für die Schlussberechnung des Geoidmodells CHGeo2004 wurde noch auf die definitive Auswertung der GPS-Messkampagne CHTRF2004 (Lösung CH\_COMBI.ED\_EF\_04b) gewartet, damit auch dieser sicherlich bis dahin beste Datensatz verwendet werden konnte. Gegenüber dem für CHGeo98 verwendeten GPS-Datensatz ergaben sich die in Abbildung 2-3 dargestellten Differenzen in den ellipsoidischen Höhen. Diese Differenzen liegen im Bereich von -5 und +7 cm und zeigen einen ziemlich deutlichen Trend in Nord-Süd-Richtung. Dies sind für eine Geoidberechnung sicherlich signifikante Beträge. Sie können aber die GPS/Nivellement-Residuen von CHGeo98 nur zu einem kleinen Teil erklären. Die verwendete GPS-Lösung aus CHTRF2004 war noch statisch, ohne eine Schätzung von Vertikal-Geschwindigkeiten.



**Abbildung 2-3:** Differenzen der ellipsoidischen Höhen CHTRF95 - CHTRF2004 auf den Punkten des GPS-Netzes LV95 und den exzentrischen GPS/Nivellement-Anschlüssen. In Rot sind die in CHGeo98 verwendeten Stützpunkte dargestellt (aus [Schlatter, 2007])

### 2.2.3 GPS/Nivellement

Durch Differenzbildung der ellipsoidischen Höhen aus GPS und den orthometrischen Höhen aus LHN95 erhalten wir die beobachteten Geoidundulationen. Für einige Punkte – insbesondere für die AGNES-Stationen – ist noch zu berücksichtigen, dass der Referenzpunkt des Nivellements nicht mit demjenigen der GPS-Auswertung übereinstimmt und noch ein zusätzlicher Höhenunterschied zu berücksichtigen ist.

Für die Geoidberechnung CHGeo2004 konnten insgesamt 193 dieser Punkte verwendet werden. Die grosse Steigerung der Anzahl gegenüber CHGeo98 war insbesondere die Errichtung der LV95-Verdichtungspunkte und deren Anschluss ans Landesnivellement, der verstärkten Aktivitäten 2002 zum Anschluss weiterer LV95-Hauptpunkte und AGNES-Stationen (CH-CGN) und natürlich auch die spezielle Kampagne CHGeo2003. Eine Übersicht sämtlicher für die Geoidberechnung verwendeter Punkte ist in Abbildung 2-4 dargestellt. Durch diese Verdichtungskampagnen haben sich die systematischen Unterschiede zwischen CHGeo98 und GPS/Nivellement durchwegs bestätigt (siehe Abbildung 2-5). Insbesondere hat sich auch im Unterengadin gezeigt, dass der Punkt in Ramosch zu unrecht als Ausreisser aus den Berechnungen für CHGeo98 eliminiert wurde. Seine beobachtete Geoidhöhe wurde durch 2 neue Punkte in der Umgebung bestätigt.

Eine wichtige Unterscheidung in der Qualität der GPS/Nivellement-Punkte besteht noch in der Dauer der gemessenen GPS-Sessionen (vgl. Abbildung 2-4). Viele der ursprünglichen exzentrischen Nivellementsanschlüsse der LV95-Hauptpunkte erfolgten nur in kurzen (ca. 4 Stunden) Session mit L1-Empfängern. Diese Punkte weisen eine geringere Genauigkeit auf und sind in der Geoidberechnung entsprechend gewichtet worden.

Die Anschlussmessungen für das Landesnivellement sind in [Schlatter et al. 2003] beschrieben, die GPS-Messkampagne CHGeo2003 und deren Auswertung in [Brockmann, 2003].

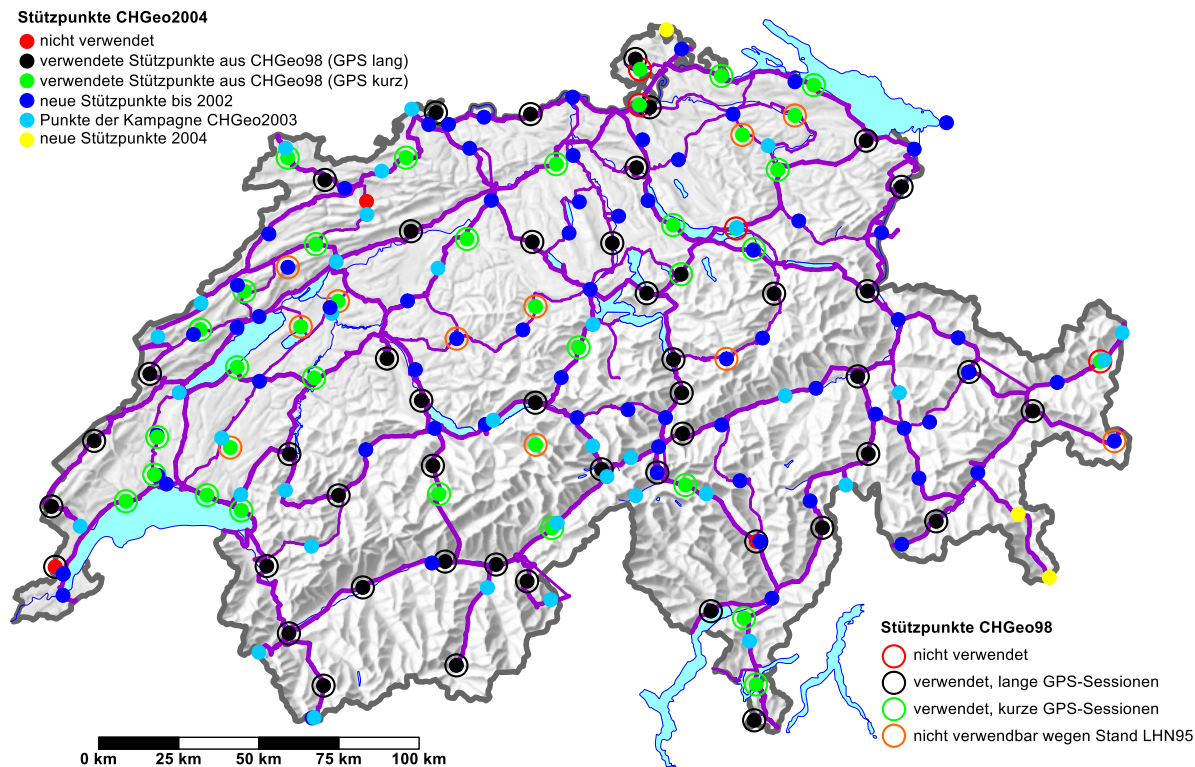


Abbildung 2-4: GPS/Nivellement-Punkte für die Geoidberechnungen CHGeo98 und CHGeo2004

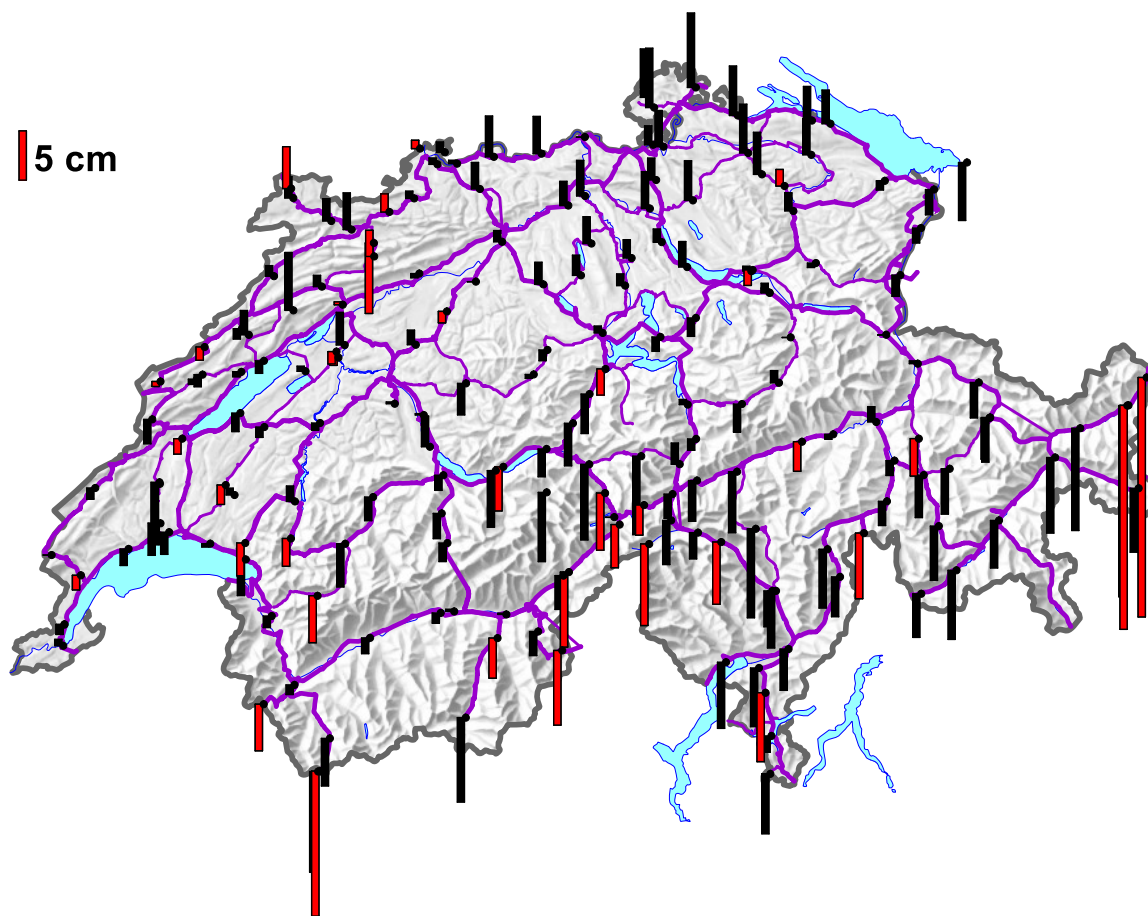
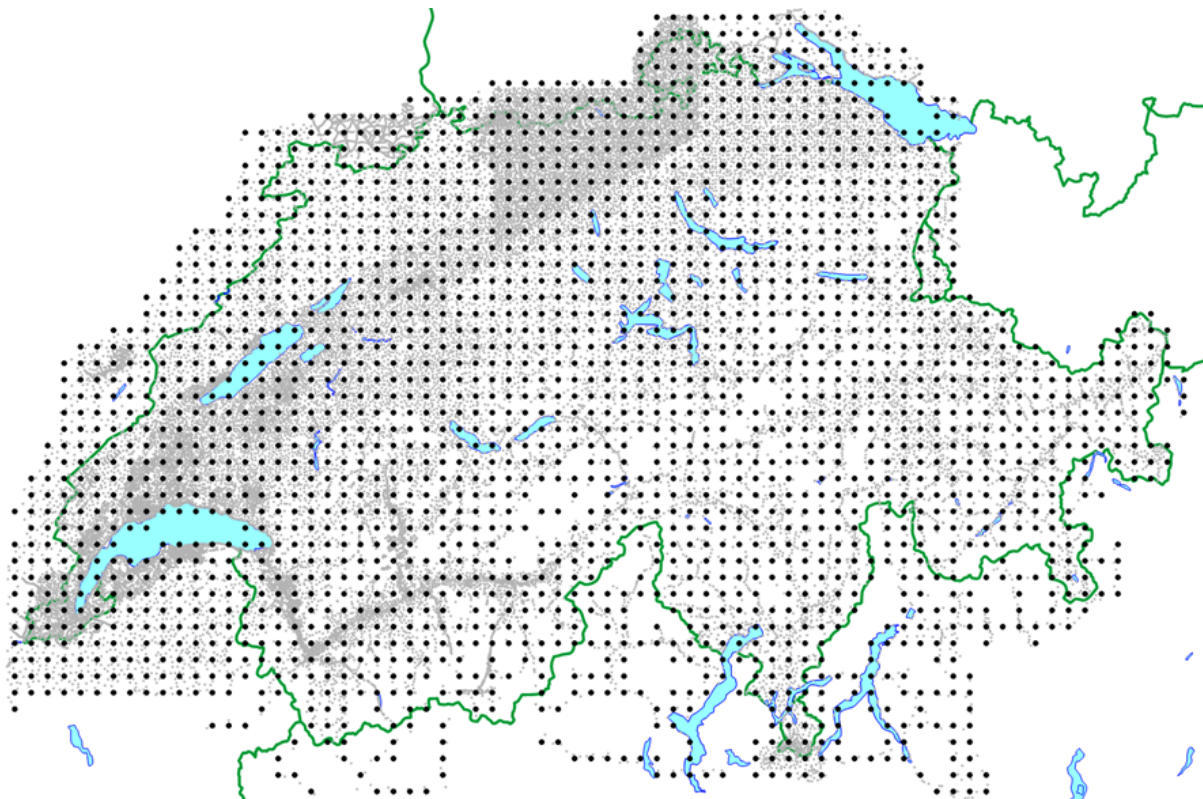


Abbildung 2-5: GPS/Nivellement-Residuen von CHGeo98 (Stand 2003). In Rot sind die Punkte der Kampagne CHGeo2003 dargestellt





**Abbildung 2-7:** Reduktion der Anzahl Schweremessungen auf ein regelmässiges 5x5 km-Gitter

## 2.4 Synthetische GPS/Nivellement-Punkte im benachbarten Ausland

Ein Problem bei der Berechnung von CHGeo98 war, dass das Modell am Rand des Berechnungssperimeters sehr rasch schlecht wird. Ausserhalb des Bereichs mit vorliegenden Messungen driftet das Modell rasch in einen unrealistischen Bereich. Dieser Bereich ist zwar für die schweizerische Landesvermessung nur von geringem Interesse, es kommt aber doch ab und zu vor, dass auch dort ungefähre Geoidhöhen benötigt werden. Deshalb wurde für CHGeo2004 entschieden, in diesem Bereich künstliche Beobachtungen einzuführen. Dies geschah in Form von ‚beobachteten‘ Höhenanomalien in einem 10x10 km Raster in demjenigen Bereich des Berechnungssperimeters, wo keine eigenen Messungen vorliegen. Diese zusätzlichen 271 Höhenanomalien (siehe Abbildung 2-8) wurden aus dem Europäischen Quasigeoid EGG97 [Denker und Torge 1998] entnommen und in den weiteren Berechnungsschritten wie ‚echte‘ GPS/Nivellement-Punkte behandelt. Um diese Daten zusammen mit allen anderen gemeinsam zu behandeln, müssen auch sie um den Einfluss der Massenmodelle reduziert werden. Dazu sind auch interpolierte Schwerewerte nötig, welche aus dem Datensatz des BGI berechnet wurden.

## 2.5 Übersicht über die verwendeten Daten

Somit haben wir folgende Daten zur Verfügung, welche für die Geoidberechnung CHGeo2004 verwendet wurden:

- 697 Lotabweichungsstationen mit 657  $\xi$ - und 618  $\eta$ -Komponenten (Total 1275 Beobachtungen)
- 193 GPS/Nivellement-Punkte, wovon 3 wegen einer ungenügenden Genauigkeit oder aus anderen Gründen eliminiert wurden
- 2225 auf ein regelmässiges Gitter interpolierte Schwerewerte
- 271 synthetische GPS/Nivellement-Punkte aus EGG97 im benachbarten Ausland

Das macht ein Total von 3961 Beobachtungen, welche zur Geoidberechnung verwendet wurden (Abbildung 2-8).

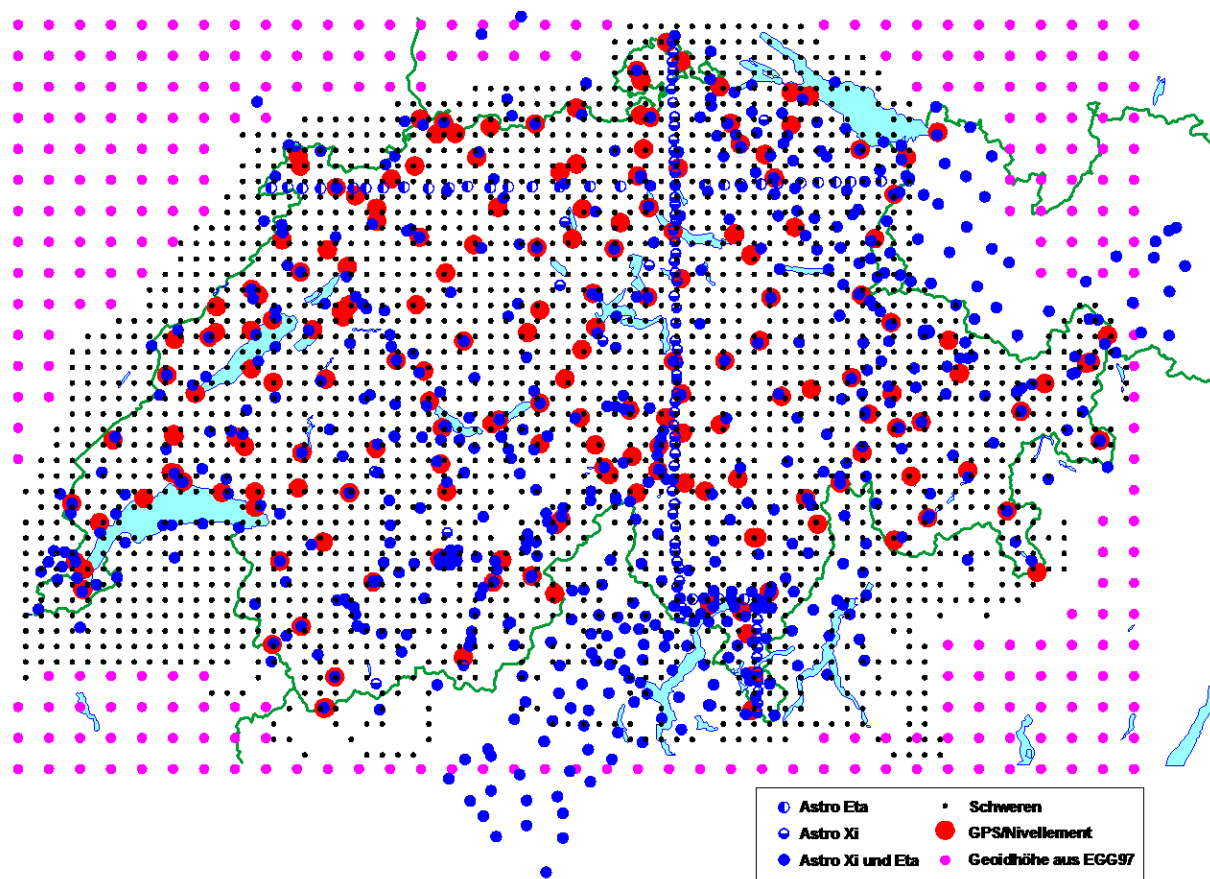


Abbildung 2-8: Für die Geoidberechnung CHGeo2004 verwendeter Datensatz



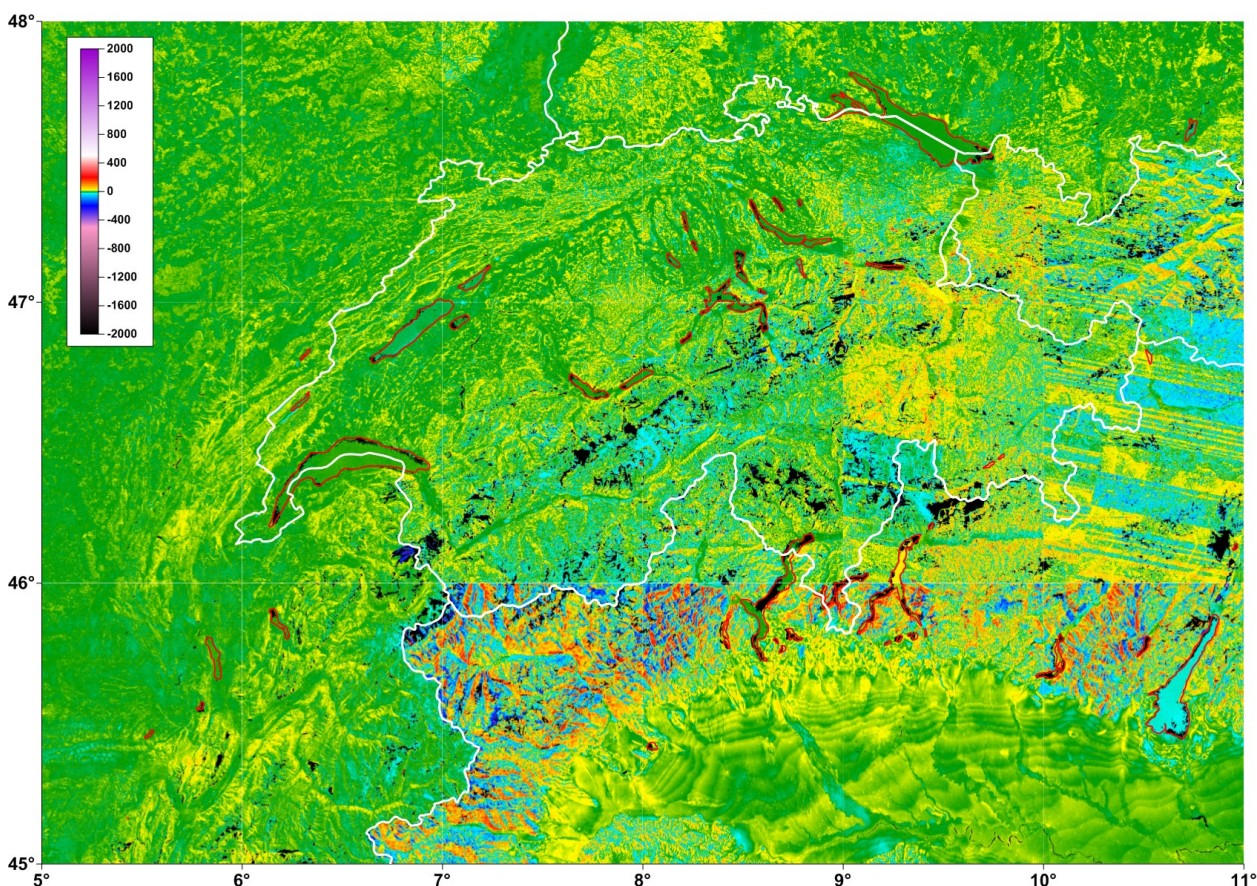
### 3 Massenmodelle

#### 3.1 Digitales Höhenmodell

Die verwendeten Massenmodelle wurden gegenüber CHGeo98 nicht wesentlich verändert. Einzig beim digitalen Höhenmodell wurde von DHM25 (Level 1) auf Level 2 gewechselt, was aber für den Zweck der Schwerefeldbestimmung nur eine unwesentliche Veränderung war. Einige wenige offensichtliche Fehler in DHM25/L2 wurden noch manuell korrigiert. Ausserhalb des Perimeters von DHM25 wurde im angrenzenden Ausland DTED1 durch SRTM3 ersetzt.

Das Modell der Topografie wurde wie schon bei der Berechnung von CHGeo98 in verschiedenen Auflösungen von 25, 50, 500 und 10'000 Metern abgespeichert. Auch der Perimeter des Modells blieb mit 410'000 – 900'000 in West-Ost-Richtung und von -10'000 bis 350'000 in Süd-Nord-Richtung unverändert.

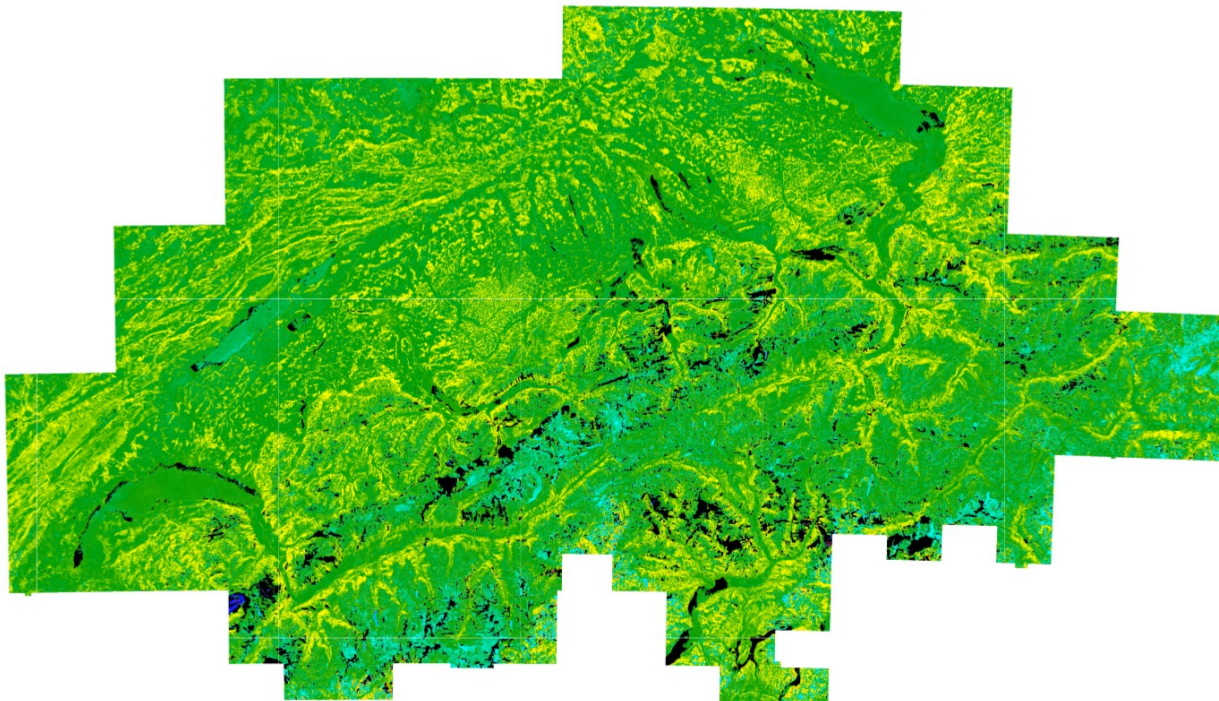
SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) ist ein frei verfügbares globales digitales Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 3". Es wurde im Februar 2000 in einer 10-tägigen Mission erhoben und deckt den Breitenbereich zwischen 56° Süd und 60° Nord ab. Seine Genauigkeit wird mit  $\pm 16$  m (90% Konfidenzintervall) angegeben. Zur Zeit der Berechnung von CHGeo2004 enthielt SRTM3 noch zahlreiche Datenlücken (ca. 3% der gesamten Oberfläche; schwarze Flecken in den folgenden Abbildungen), welche mit den ungenaueren DTED1-Daten gefüllt werden mussten. Die Unterschiede zwischen DTED1 und SRTM3 können bis zu 2000 m betragen (siehe Abbildung 3-1). Insbesondere in Norditalien, aber auch in Österreich brachte SRTM3 eine erhebliche Verbesserung. Diese Ungenauigkeiten von DTED1 sind in erster Linie eine Folge der ungenügenden Positionierung (Georeferenzierung) der Originaldaten (in der Regel digitalisierte Höhenkurven aus topografischen Karten).



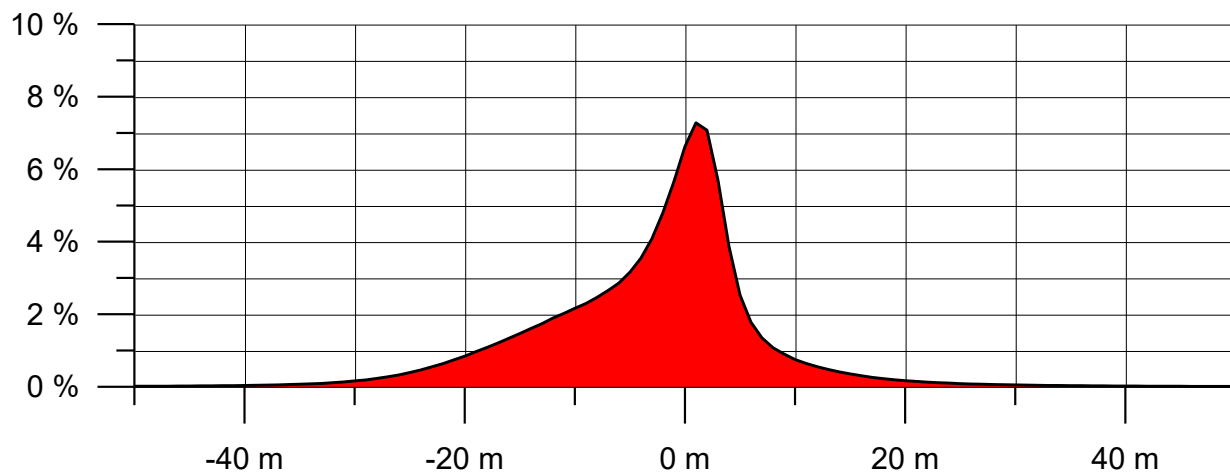
**Abbildung 3-1:** Unterschiede zwischen SRTM3 und DTED1. Schwarze Flecken kennzeichnen Datenlücken in SRTM3

Um die Genauigkeit noch zu verifizieren, wurde SRTM3 auch mit DHM25 verglichen. Dies ergab die in Abbildung 3-2 dargestellten Differenzen. In dieser Abbildung ist auch zu sehen, dass SRTM3 in vielen Regionen höher ist als DHM25 (gelbliche Zonen). Diese Zonen fallen in der Regel mit bewaldeten Gebieten zusammen, was noch einmal bestätigt, dass SRTM3 ein Oberflächenmodell ist. Dies wird auch

im Histogramm in Abbildung 3-3 der Differenzen deutlich, welches signifikant von einer Normalverteilung abweicht. Insgesamt stimmt aber die angegebene Genauigkeit von SRTM3 sehr gut mit den empirischen Untersuchungen in der Schweiz zusammen.

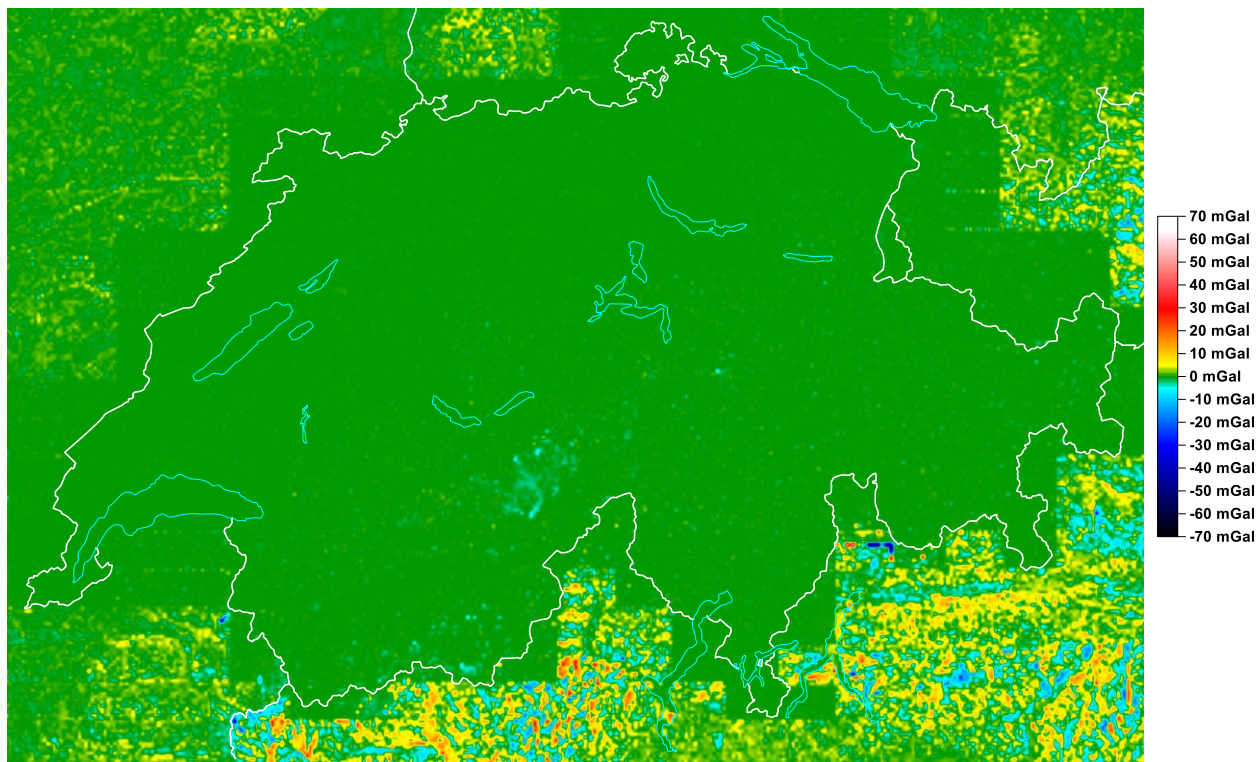


**Abbildung 3-2:** Unterschiede zwischen SRTM3 und DHM25 (Farbmasstab wie in Abbildung 3-1)

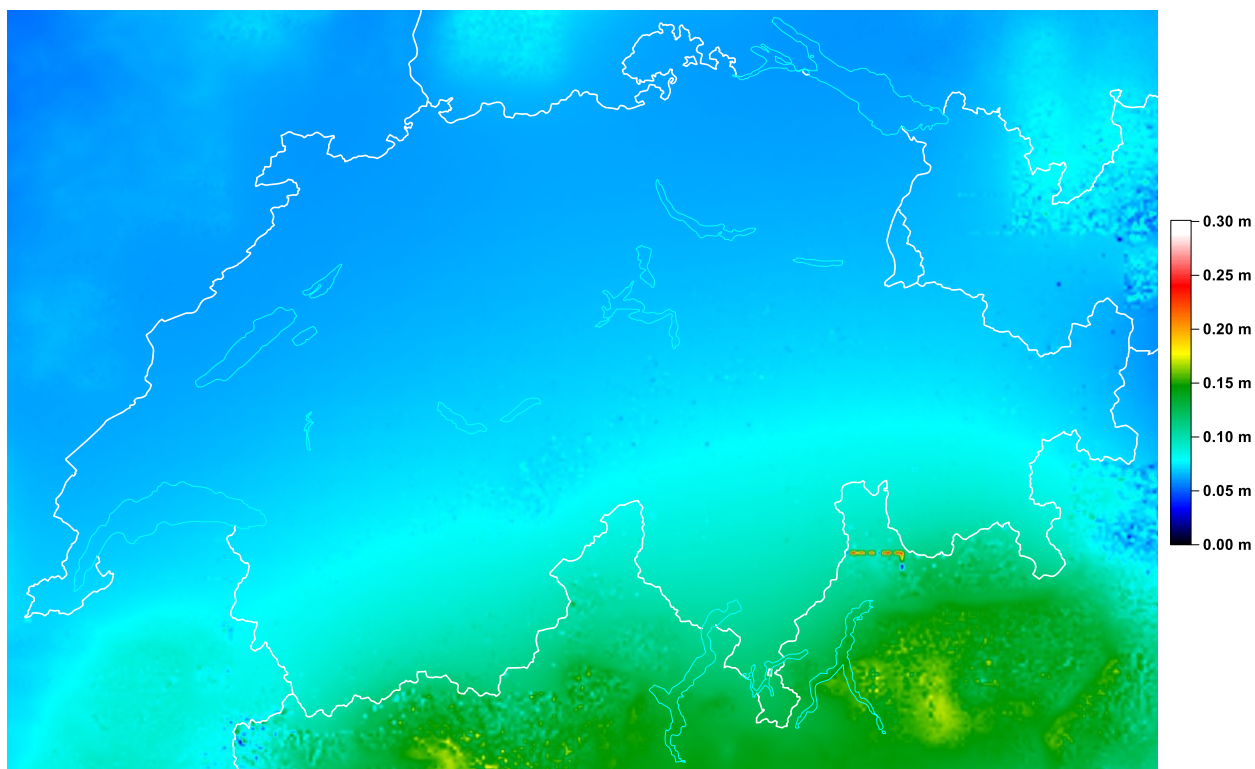


**Abbildung 3-3:** Histogramm der Differenzen DHM25 minus SRTM3

Um die Auswirkungen der Verwendung der neuen DHMs (SRTM3 und DHM25/L2) gegenüber den in CHGeo98 (DTED1 und DHM25/L1) auf die Schwerefeldbestimmung zu zeigen, wurde der topografische Effekt beider Modelle auf die Schwere (Abbildung 3-4) und auf die Geoidundulation (Abbildung 3-5) berechnet.



**Abbildung 3-4:** Differenzen des topografischen Effekts auf die Schwere berechnet mit DHM25/L2 und SRTM3 minus DHM25/L1 und DTED1 [in mGal]



**Abbildung 3-5:** Differenzen des topografischen Effekts auf die Höhenanomalie berechnet mit DHM25/L2 und SRTM3 minus DHM25/L1 und DTED1 [in m]

Innerhalb der Schweiz sind die Unterschiede recht gering, was auf die für die Schwerefeldberechnung meist unbedeutenden Unterschiede zwischen DHM25/L1 und DHM25/L2 hindeutet. Im angrenzenden Ausland zeigen sich aber deutlich die durch die Verwendung von SRTM3 erreichten Verbesserungen. Die Differenzen in der Schwere liegen in einem Bereich von -64 bis +67 mGal und zeigen ein sehr

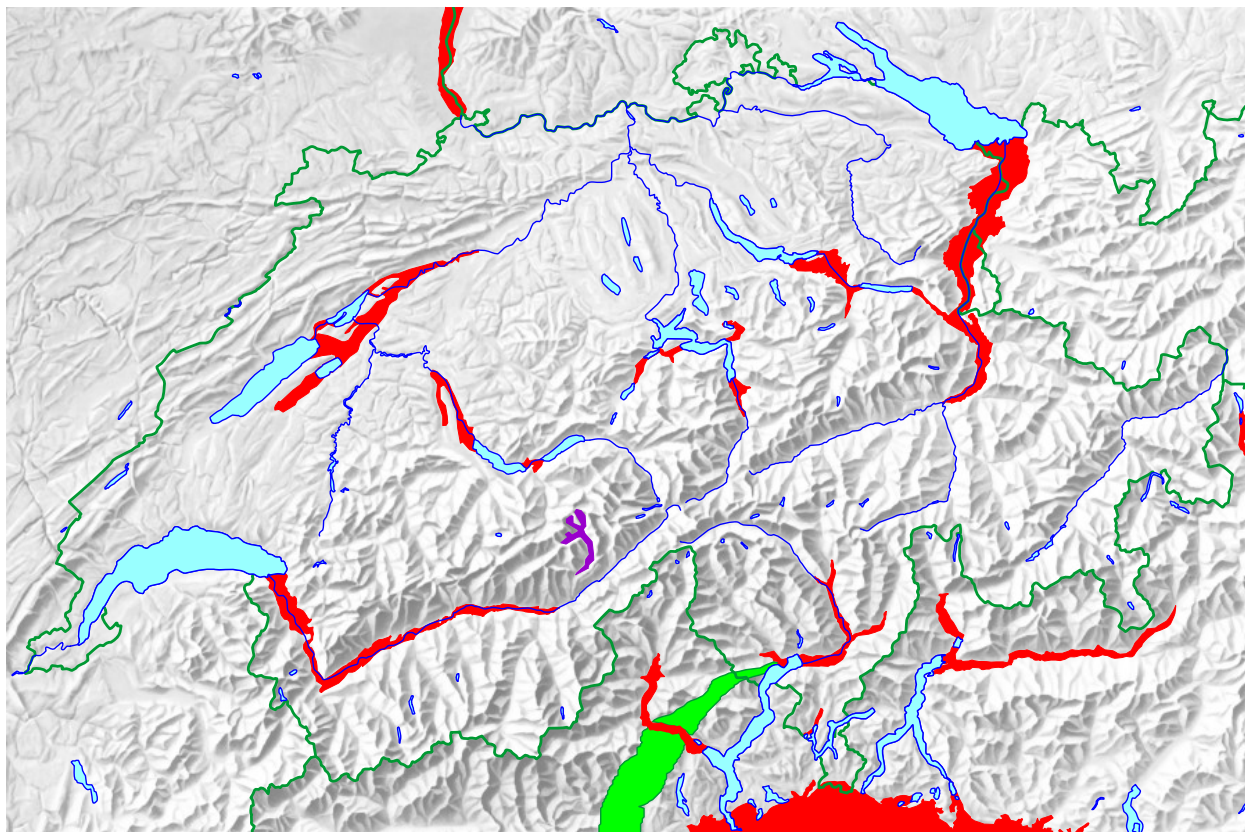
hochfrequenten Verhalten. Diese Differenzen sind auch der Hauptgrund dafür, dass in der Geoidberechnung CHGeo98 viele Lotabweichungsmessungen in Norditalien aus den Berechnungen eliminiert wurden, da sie fälschlicherweise als Ausreisser kategorisiert wurden.

Die Unterschiede in den Höhenanomalien liegen zwischen 0 und 27 cm und zeigen logischerweise ein sehr viel ruhigeres Verhalten als bei den Schweren und können leicht interpoliert werden. Deshalb zeigen sie auch nicht direkt den Fehler im berechneten Geoid, da sich der grösste Teil des Fehlers mit der angewendeten Remove-Restore-Methode wieder aufhebt.

### 3.2 Übrige Massenmodelle

Die übrigen Massenmodelle für die Berechnung wurden unverändert wie in CHGeo98 beibehalten. Dies betrifft das Moho-Modell, das Modell des Ivreakörpers, die Wassermassen der Seen, das Modell der Po-Sedimente, die Quartärfüllungen der Haupttäler und den Aletschgletscher. Eine genaue Beschreibung dieser Modelle ist in [Marti, 1997] enthalten. Die verwendeten Dichtewerte sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Zusätzlich wurde noch ein sehr simples Modell der Oberflächendichten für die topografische Reduktion verwendet. Dieses enthält die wichtigsten Quartärsedimente, den Ivreakörper und die Po-Sedimente. Dieses in Abbildung 3-6 dargestellte Modell entstand aus der Digitalisierung der tektonischen Karte 1:500'000.



**Abbildung 3-6:** Verwendetes Oberflächendichtemodell

**Tabelle 3-1:** Verwendete Dichten der Massenmodelle

Massenmodell	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
Standardtopografie	2.67
Wasser der Seen	1.00
Eis der Gletscher	0.90
Quartäre Sedimente	2.00
Oberste Schicht der Po-Sedimente	1.90
Oberste Schicht des Ivreakörpers	3.10

### 3.3 Das globale Referenzmodell EGM96

Die Verwendung eines globalen Referenzmodells ist eine übliche Vorgehensweise bei einer lokalen Geoidbestimmung. Dabei werden alle Messungen um den Einfluss dieses Modells reduziert. Dies hat den Vorteil, dass der grösste Teil eines globalen Trends eliminiert wird, ohne dass man sich um dessen Ursache kümmern muss. Eine separate Trendbestimmung entfällt somit und sehr weit entfernte oder sehr tief liegende Massenmodelle müssen in der Berechnung nicht berücksichtigt werden.

Die Verwendung eines globalen Modells verursacht aber auch einige Schwierigkeiten, da ein Teil der Wirkung der lokalen Massenmodelle bereits in der Wirkung des globalen Modells enthalten ist. Somit müssen bei der Berechnung der Wirkungen der lokalen Modelle (z.B. der Topografieeinfluss) nur die hochfrequenten Anteile berücksichtigt werden, welche nicht schon im globalen Modell enthalten sind. Dies führt zum Konzept der „residuellen topografischen Korrektur“ (residual terrain correction, RTC). Aber nicht nur die Topografie, sondern auch alle anderen Massenmodelle enthalten Anteile, welche schon im globalen Modell enthalten sind. Ihre Wirkungen müssen somit in einen langwelligen und einen kurzwelligen Anteil separiert werden.

Zur Zeit der Berechnung von CHGeo2004 war das EGM96 (Earth Gravitational Model 1996; [Lemoine et al. 1998]) das aktuellste und genaueste globale Modell und wurde für die Berechnung verwendet. Das EGM96 ist 1996 aus der Analyse von Satellitenbahnen, Satellitenaltimetrie und terrestrischen Gravimetriedaten in einer Zusammenarbeit der NASA und des NIMA (heute NGA) entstanden. Seine räumliche Auflösung beträgt ca. 50 km (Grad und Ordnung 360 des Kugelfunktionsmodells).

In Abbildung 3-7 ist seine Wirkung auf das Geoid in der Schweiz dargestellt. Darin sieht man seine beschränkte räumliche Auflösung aber bereits auch die Hauptcharakteristiken des lokalen Geoids mit Tiefstwerten im Mittelland, den Höchstwerten im südlichen Wallis und dem starken Abfall gegen die Po-Ebene. Feinere Strukturen wie z.B. die grösseren Alpentäler sind in diesem Modell jedoch nicht sichtbar.

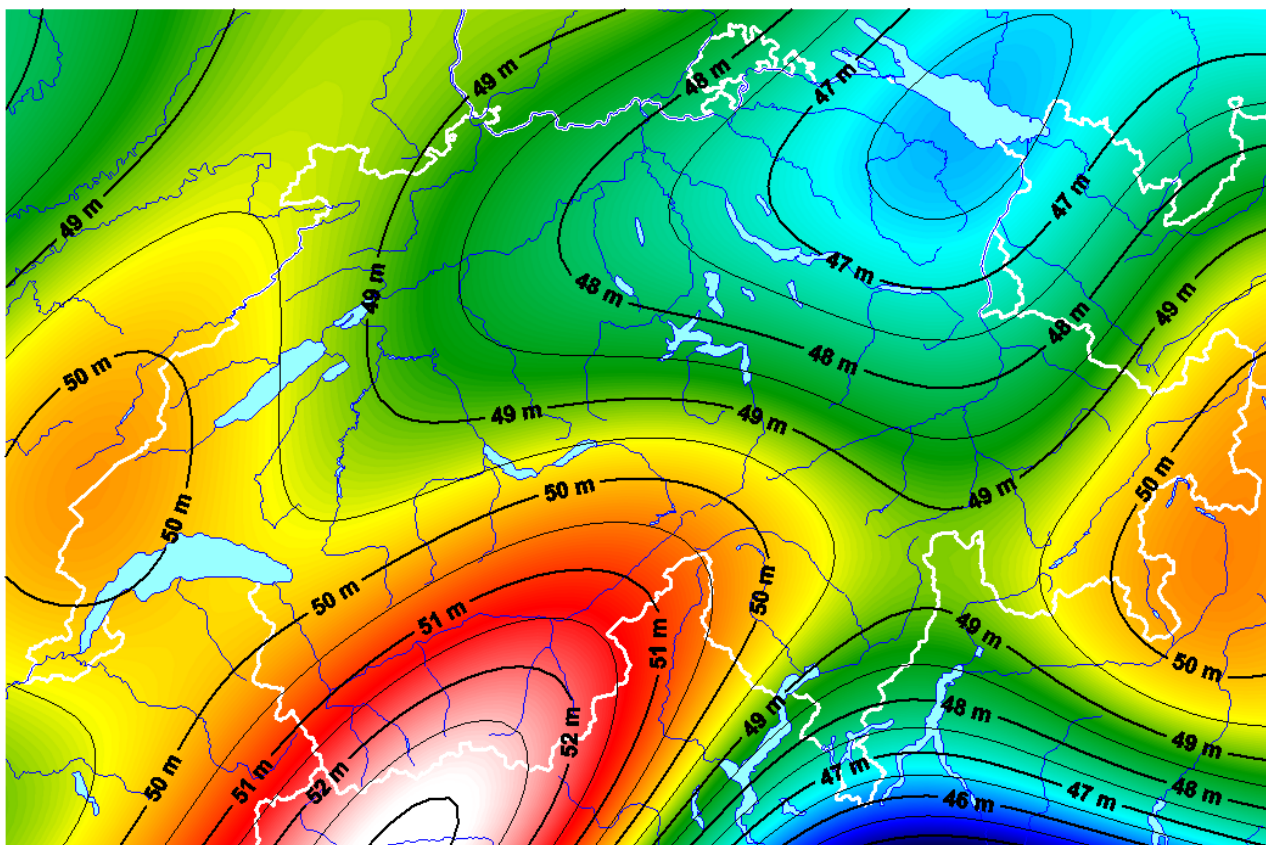


Abbildung 3-7: Das Referenzmodell (Geoid) EGM96 in der Schweiz

## 4 Reduktion der Beobachtungen

Für die Anwendung der Kollokationsmethode müssen zunächst alle Beobachtungen um den Einfluss der bekannten Massen und Modelle reduziert werden. Diese umfassen das globale Modell EGM96, die Topografie und eventuell weitere Massenmodelle.

### 4.1 Bemerkung zum Referenzsystem

Die Messungen (v.a. Lotabweichungen und GPS-Nivellement-Daten) und Stationskoordinaten können in verschiedenen Referenzsystemen angegeben werden. Natürlich ist darauf zu achten, dass diese für die Geoidbestimmung konsistent angewendet werden. Alle Berechnungen für CHGeo2004 wurden grundsätzlich in ETRS89 (identisch mit CHTRS95) durchgeführt. Allerdings lag das digitale Höhenmodell nur in der Schweizer Projektion (LV03 und LV95) vor. Deshalb wurden alle Einflüsse der lokalen Dichtemodelle im Schweizerischen Projektionssystem unter Berücksichtigung der Erdkrümmung berechnet. Dies hat keine wesentlichen Nachteile für eine lokale Geoidbestimmung. Die kleinen entstehenden Unterschiede wegen der Projektionsverzerrungen sind vernachlässigbar.

Auch wurde keine Höhentransformation durchgeführt. Alle Höheninformationen wurden so belassen, wie sie in den Originaldaten ausgewiesen sind und so behandelt, als seien alle Höhen im System LN02. Dies ist nicht streng korrekt, und der Einfluss ist bei der Berechnung des Topografieinflusses auf die Schwere oder auch für die Berechnung von Höhenanomalien nicht vernachlässigbar. Für die Berechnung der Wirkung des globalen Modells müssen ellipsoidische Höhen als Input verwendet werden. Diese wurden aus den LN02-Höhen zunächst durch Anbringen des Geoidmodells CHGeo98 berechnet und in späteren Berechnungsschritten dann aus provisorischen Lösungen des CHGeo2004 und HTRANS.

### 4.2 Reduktion des globalen Modells

Für die Berechnung des Einflusses eines globalen Kugelfunktionsmodells auf verschiedenste Komponenten des Schwerefeldes stand uns eine leicht modifizierte Version des Programms GEOPPT (ursprünglich von HG Wenzel, Uni Karlsruhe) zur Verfügung. Damit wurden die Lotabweichungen und die Schweren um den Einfluss des globalen Modells reduziert, wobei als Input die ellipsoidischen Koordinaten mit ellipsoidischen Höhen zu verwenden waren. Analog wurden auch Höhenanomalien und Geoidundulationen (GPS-Nivellement-Punkte) reduziert. Allerdings muss dabei die ellipsoidische Höhe 0 als Input verwendet werden.

### 4.3 Reduktion des Einflusses der Topografie

Der Topografieeinfluss wurde in einem ersten Schritt gleich wie für CHGeo98 [Marti, 1997] mit denselben Parametern berechnet. Die wichtigsten davon sind: Berechnung mit der vollen Auflösung von DHM25 für die nächsten 100 Meter, mit der 50-Meter-Auflösung bis zu 1250 Meter, mit der 500-Meter-Auflösung bis zu 50 km. Zunächst wurde der Effekt mit einer einheitlichen Dichte von  $2.67 \text{ g/cm}^3$  gerechnet. Der Einfluss wegen abweichenden Dichten (Abbildung 3-6) wurde in einem separaten Schritt berechnet.

Nun muss aber, wie in Kapitel 3.3 bereits erwähnt, vom berechneten Topografieeinfluss noch derjenige Teil subtrahiert werden, welcher schon im globalen Referenzmodell enthalten ist. Dazu wurde zunächst eine geglättete Version des Topografiemodells erstellt, indem ein gleitendes Mittel über 50 km (der Auflösung des EGM96) des Originalmodells berechnet wurde. Der Einfluss dieses Modells wurde dann berechnet und vom vollständigen Topoeffekt subtrahiert. Bei der Reduktion der Schwerewerte tritt dabei noch eine zusätzlich nötige Korrektur auf: Durch das Bilden des geglätteten Topografiemodells gelangen sehr viele Messpunkte unter die Oberfläche dieses Modells, obwohl sie eigentlich in der „freien Luft“ liegen. Deshalb muss für alle Punkte, die innerhalb des geglätteten Modells zu liegen kommen, noch diese sogenannte „harmonische Korrektur“ angebracht werden, welche einer Bouguerplatten-Korrektur entspricht (siehe z.B. Forsberg, 1994):

$$\Delta g_{\text{harm}} = 4\pi\Gamma\rho(h_{\text{ref}} - h_p)$$

Wobei  $\Gamma$  die Gravitationskonstante,  $\rho$  die Gesteinsdichte,  $h_{\text{ref}}$  die Höhe des geglätteten Topografie-Modells und  $h_p$  die Höhe des Messpunktes bezeichnet. Für Lotabweichungen und beobachtete Geoidhöhen ist diese Korrektur 0.

#### 4.4 Einfluss der übrigen Massenmodelle

Die Schwierigkeit bei der Berechnung des Einflusses der übrigen Massenmodelle ist, dass bei der Verwendung eines globalen Referenzmodells wie EGM96 ein Teil der Wirkungen schon in diesem enthalten ist, analog zur Topografie. Deshalb müsste eigentlich auch jedes dieser Modelle in einen langwelligen und in einen kurzwelligen Anteil aufgeteilt werden. Dieses Vorgehen ist aber eher kompliziert und kaum befriedigend zu lösen. Es gibt kleine, lokale Modelle wie zum Beispiel die Seen oder die quartären Talfüllungen, welche im globalen Modell keine sichtbaren Anteile haben. Deren Einflüsse können problemlos gerechnet und reduziert werden. Grossräumigere Modelle wie zum Beispiel der Ivreakörper oder die Sedimente der Po-Ebene enthalten sowohl kurzwellige als auch langwellige Anteile. Diese müssten aufgeteilt werden. Noch grossräumigere Modelle wie zum Beispiel die Moho sind fast vollständig im globalen Modell enthalten und müssen eigentlich nicht mehr separat berücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung dieser Massenmodelle hat in der Geoidbestimmung eigentlich 2 Funktionen:

- Die Glättung des Residualfeldes für die erleichterte Interpolation
- Die Reduktion der Beobachtungen von der Punkthöhe auf die Höhe des Geoids

Der zweite Zweck kann auch erreicht werden, falls nur die Differenz der Massenwirkung auf Punkthöhe minus die Massenwirkung auf Höhe des Geoids reduziert wird. Dieser Anteil ist normalerweise lokal begrenzt und enthält alle hochfrequenten Anteile auch für grossräumige Modelle. Damit ist auch ein Teil des ersten Zweckes erreicht. Für die Berechnung von CHGeo2004 wurde deshalb diese Methode gewählt. Das heisst, dass bei der Reduktion von Ivreakörper, Po-Ebene und Moho nur die Differenz oben minus unten subtrahiert wurde. Dies ist ein pragmatischer Ansatz, um die Aufspaltung der Wirkung der Modelle zu umgehen. Für die Geoidberechnung genügt dies. Ein Nachteil ist, dass ein relativ starker Anteil dieser Modelle in den reduzierten Beobachtungen verbleibt, welcher in der Kollokation dann noch zu interpolieren ist. Dies gilt insbesondere für den Ivreakörper, wie in den folgenden Abbildungen ersichtlich ist.

#### 4.5 Reduktion wegen der Residualschwere

Falls die Geoidberechnung mit beobachteten Höhenanomalien aus Normalhöhen und ellipsoidischen Höhen durchgeführt wird, so müssen diese noch um einen kleinen verbleibenden Anteil wegen der Nichtparallelität der Äquipotentialflächen auf Meereshöhe reduziert werden. Diese ergibt sich ganz einfach aus der interpolierten Residualschwere (nach Abzug aller berücksichtigten Massenwirkungen) multipliziert mit der Meereshöhe. Falls man diese Korrektur anbringt, erhält man exakt dieselben Resultate, wie wenn man mit beobachteten Geoidhöhen aus der Differenz zwischen orthometrischen und ellipsoidischen Höhen rechnet.

## 4.6 Darstellung der Reduktion der Lotabweichungen

In diesem Kapitel werden die einzelnen Reduktionsschritte anhand der Lotabweichungen illustriert. In Abbildung 4-1 sind die beobachteten Lotabweichungen dargestellt. Sie zeigen einen sehr unruhigen Verlauf und nehmen Beträge von mehr als 1 Bogenminute an.

Die Reduktion um das globale Modell EGM96 (Abbildung 4-2) bringt generell eine Reduktion der Beträge der Lotabweichungen. In grossen Teilen des Mittellandes sind diese reduzierten Werte schon sehr klein geworden. Natürlich ist das Bild immer noch sehr unruhig wegen des Einflusses der Topografie.

Nachdem wir auch das Topografiemodell subtrahiert haben (Abbildung 4-3), erhalten wir ein Residualfeld, das in der Regel nur noch sehr kleine Beträge enthält. Die verbleibenden Lotabweichungsanteile zeigen nun ein sehr ruhiges Bild mit systematischen Anteilen mit Wellenlängen von kürzer als 50 km. Deutlich zu sehen ist der noch enthaltene Anteil der Wirkung des Ivreakörpers. Auch werden hier einige einzelne Ausreisser sichtbar, welche nicht in das generelle Bild der Lotabweichungen passen.

Die Reduktion um die weiteren Massenmodelle verändert das Bild nicht mehr wesentlich, da es sich nur um sehr kleine, vor allem lokale Wirkungen handelt.

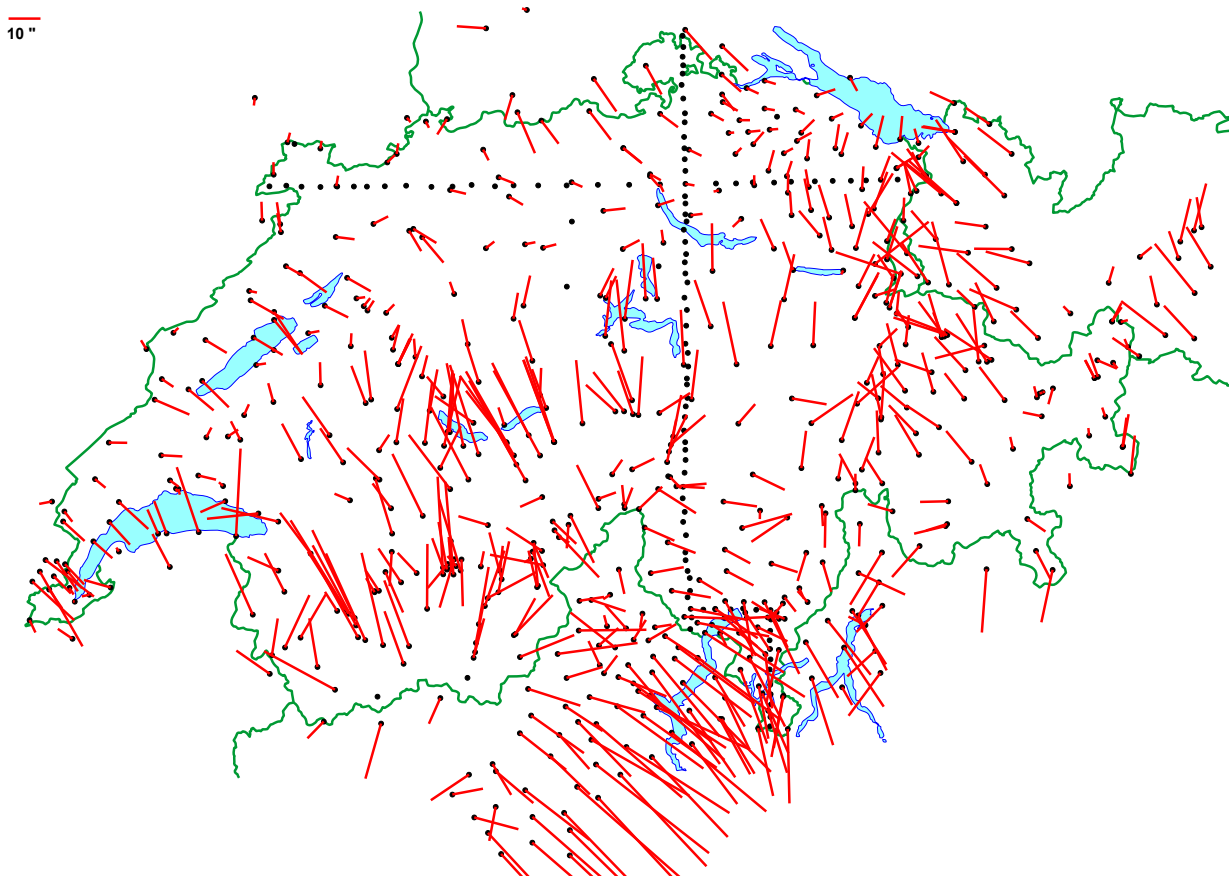
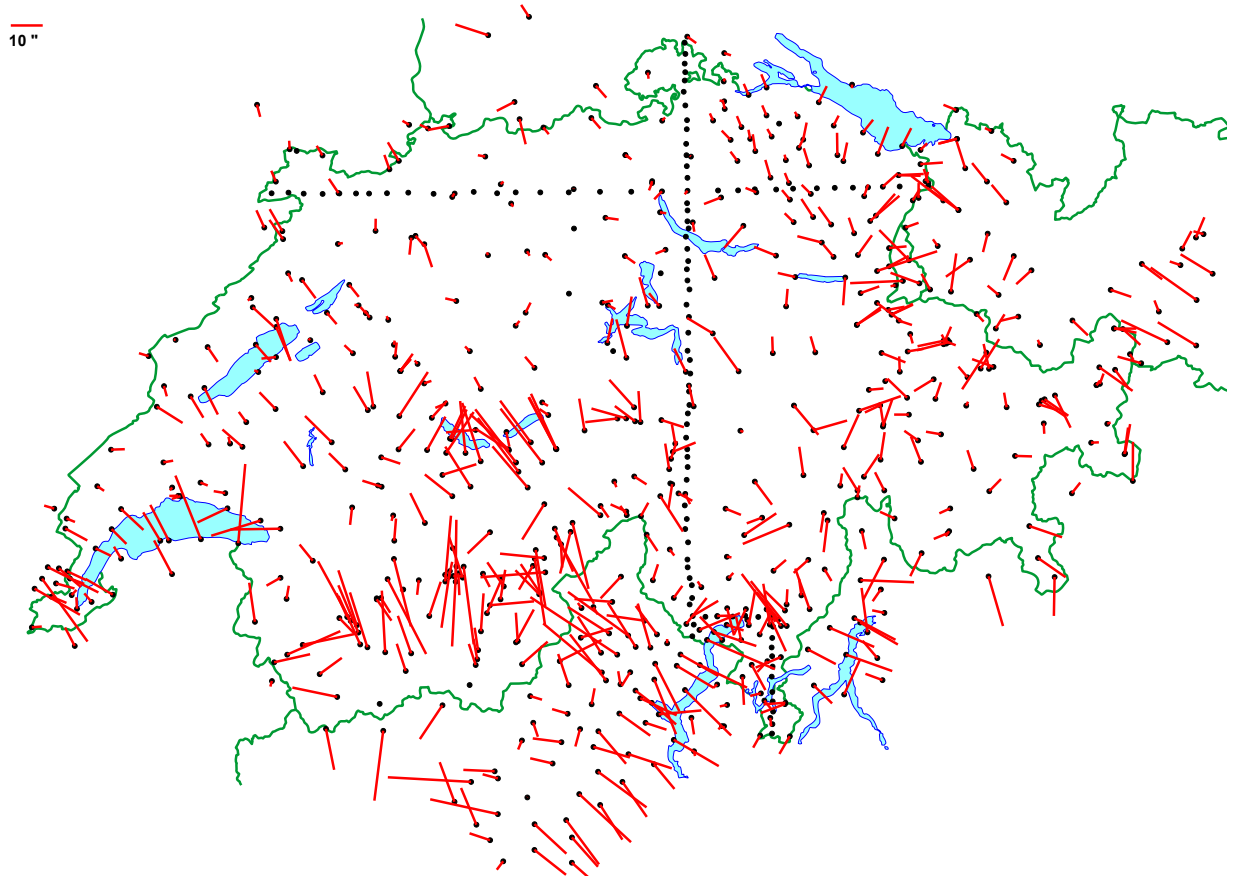
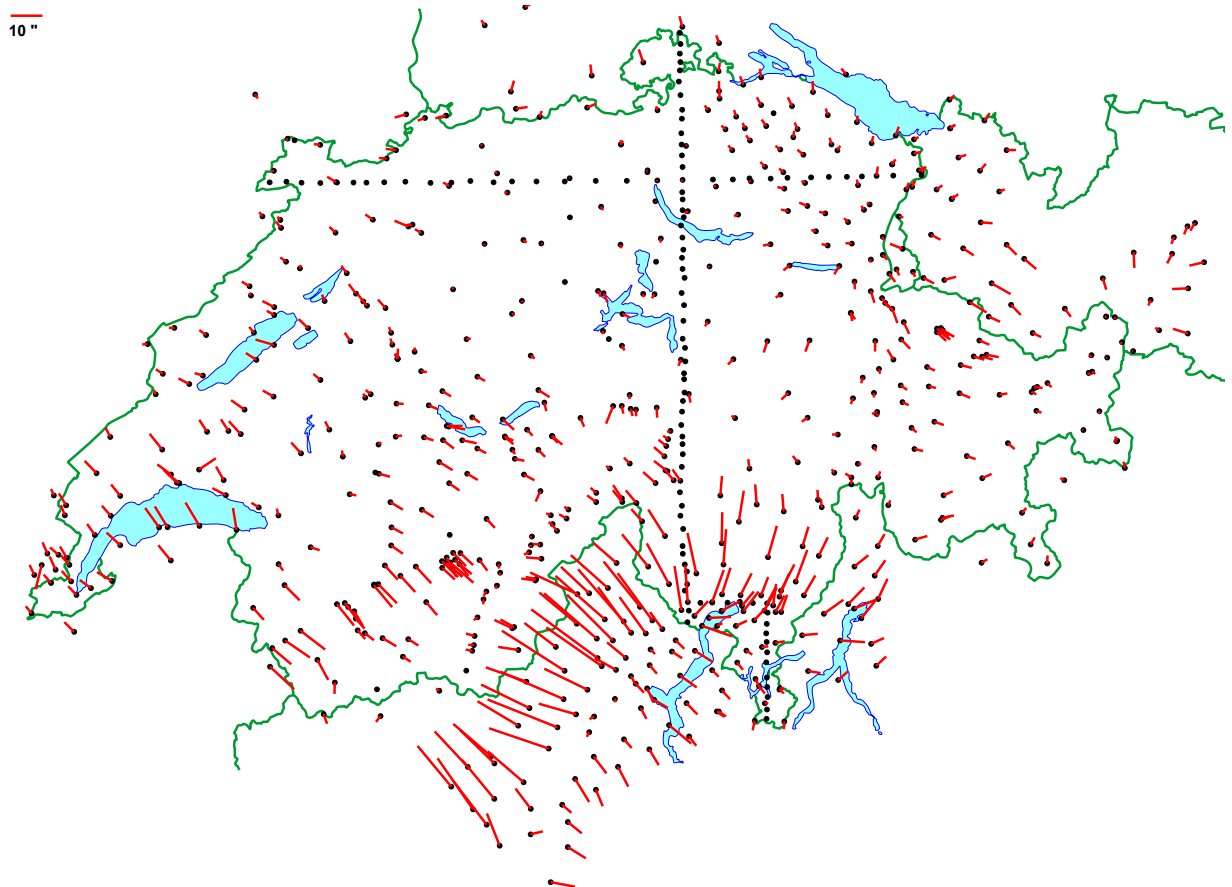


Abbildung 4-1: Beobachtete Lotabweichungen





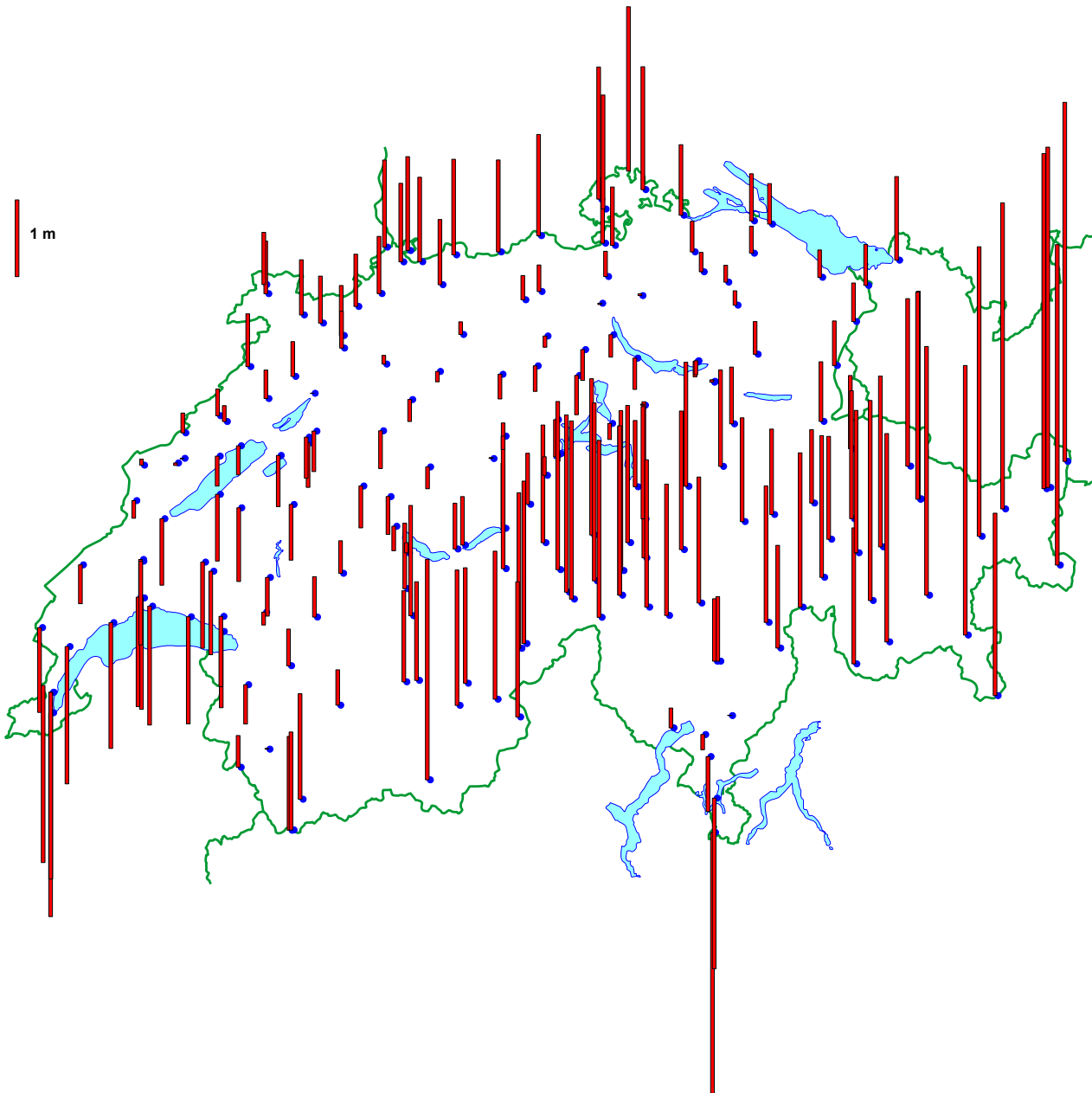
**Abbildung 4-2:** Um EGM96 reduzierte Lotabweichungen



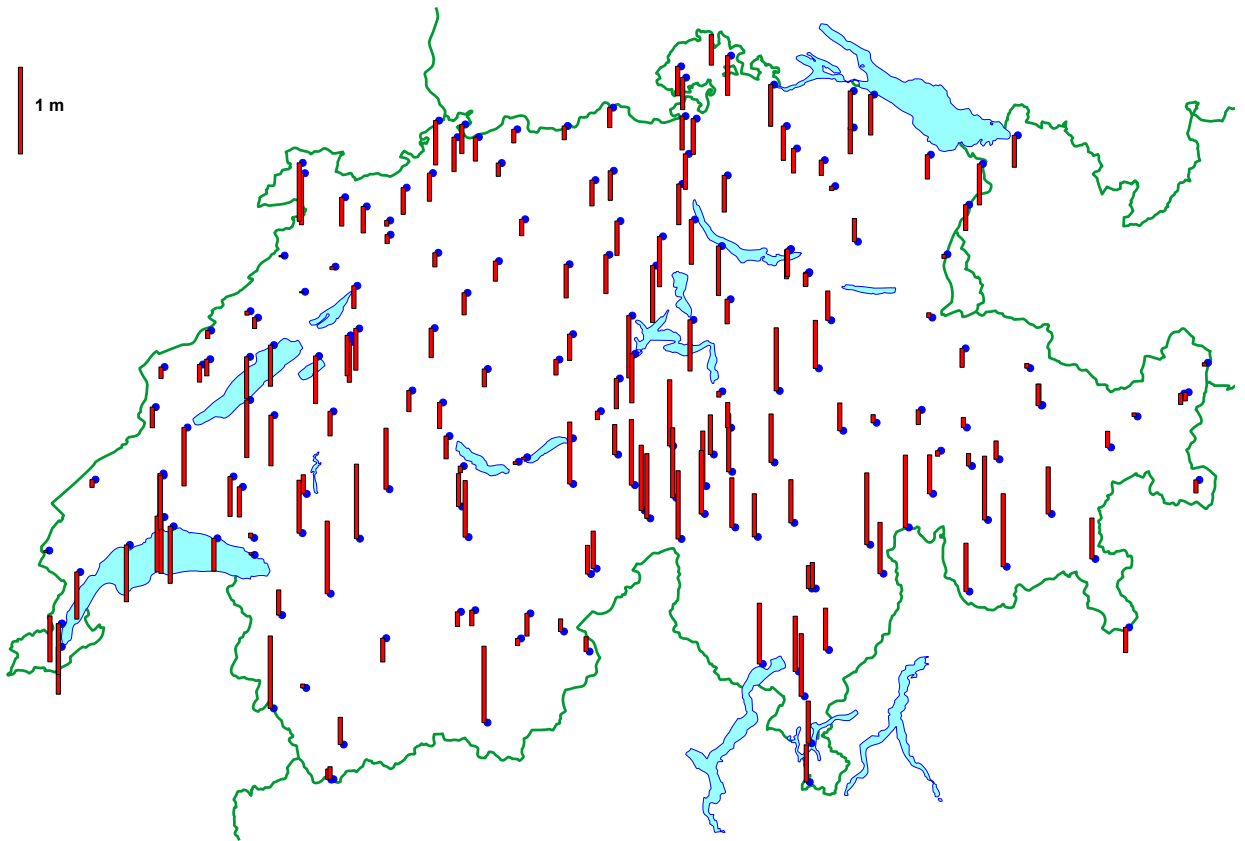
**Abbildung 4-3:** Um EGM96 und Topografie reduzierte Lotabweichungen

#### 4.7 Reduktion der GPS/Nivellement-Daten

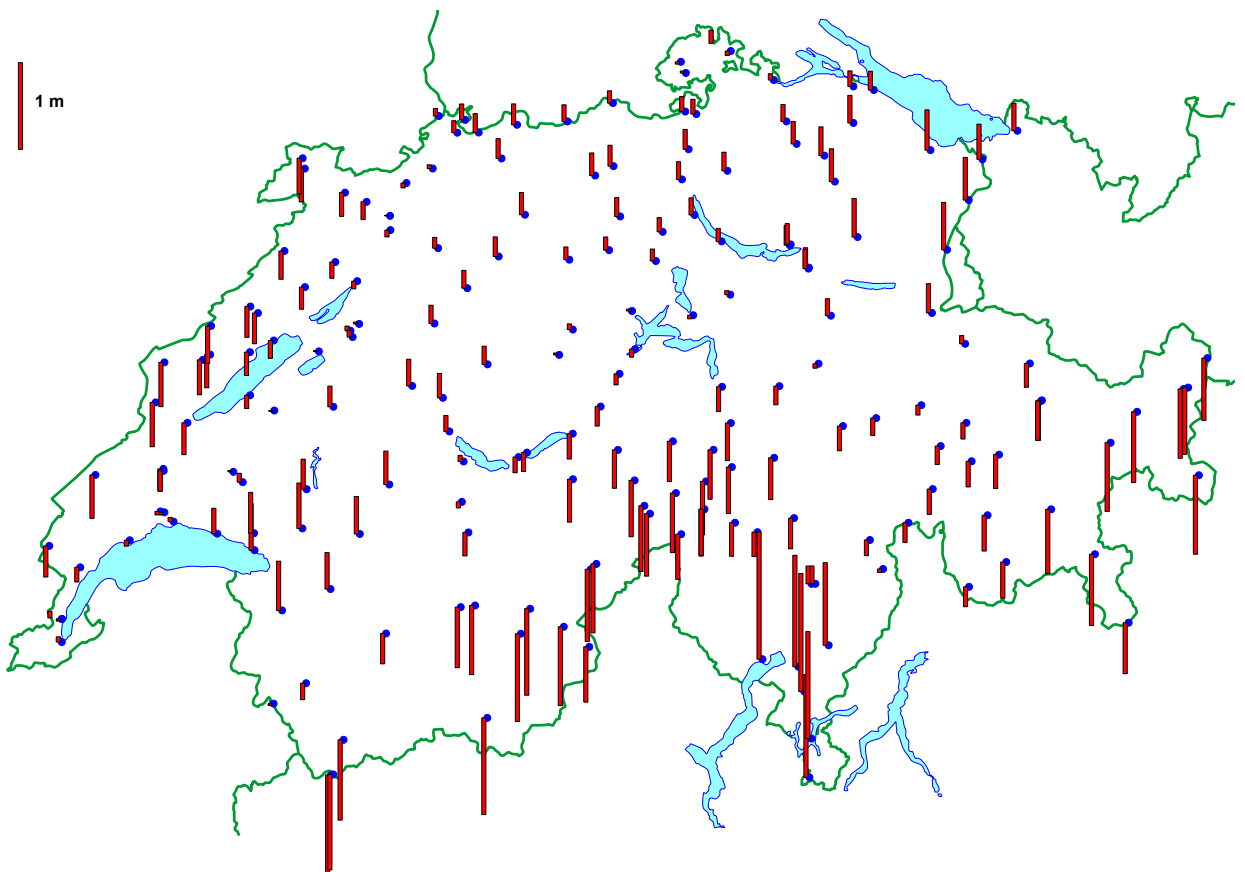
Analog wie die Lotabweichungen wurden auch die GPS/Nivellement-Daten reduziert und in den folgenden Abbildungen dargestellt. Bei ihnen bewirkt die Reduktion um das globale Modell eine wesentlich deutlichere Reduktion der Absolutbeträge als bei den Lotabweichungen, und der Topografieeinfluss enthält keine sehr hochfrequenten Anteile. Es ist noch zu beachten, dass die beobachteten Geoidhöhen (Abbildung 4-4) im Referenzsystem CH1903+ dargestellt sind, da sich die tatsächlich für die Berechnung verwendeten Werte im ETRS89 (um die 50 Meter) nicht mehr in diesem Massstab darstellen lassen.



**Abbildung 4-4:** Beobachtete GPS/Nivellement-Höhen (im System CH1903+)



**Abbildung 4-5:** Um EGM96 reduzierte Geoidhöhen



**Abbildung 4-6:** Um EGM96 und Topografie reduzierte Geoidhöhen

## 4.8 Reduktion der Schweredaten

Der Vollständigkeit halber ist in Abbildung 4-7 noch der reduzierte Schweredatensatz dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Residualanomalie nach Abzug des globalen Referenzmodells EGM96, des Einflusses der Topografie und der weiteren, in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Modellen. Es handelt sich also nicht um Bouguer-Anomalien. Deutlich sichtbar sind der in den Residuen noch enthaltene Einfluss des Ivreakörpers und teilweise auch die ungenügende Modellierung der Quartärfüllungen (insbesondere im unteren Rhonetal).

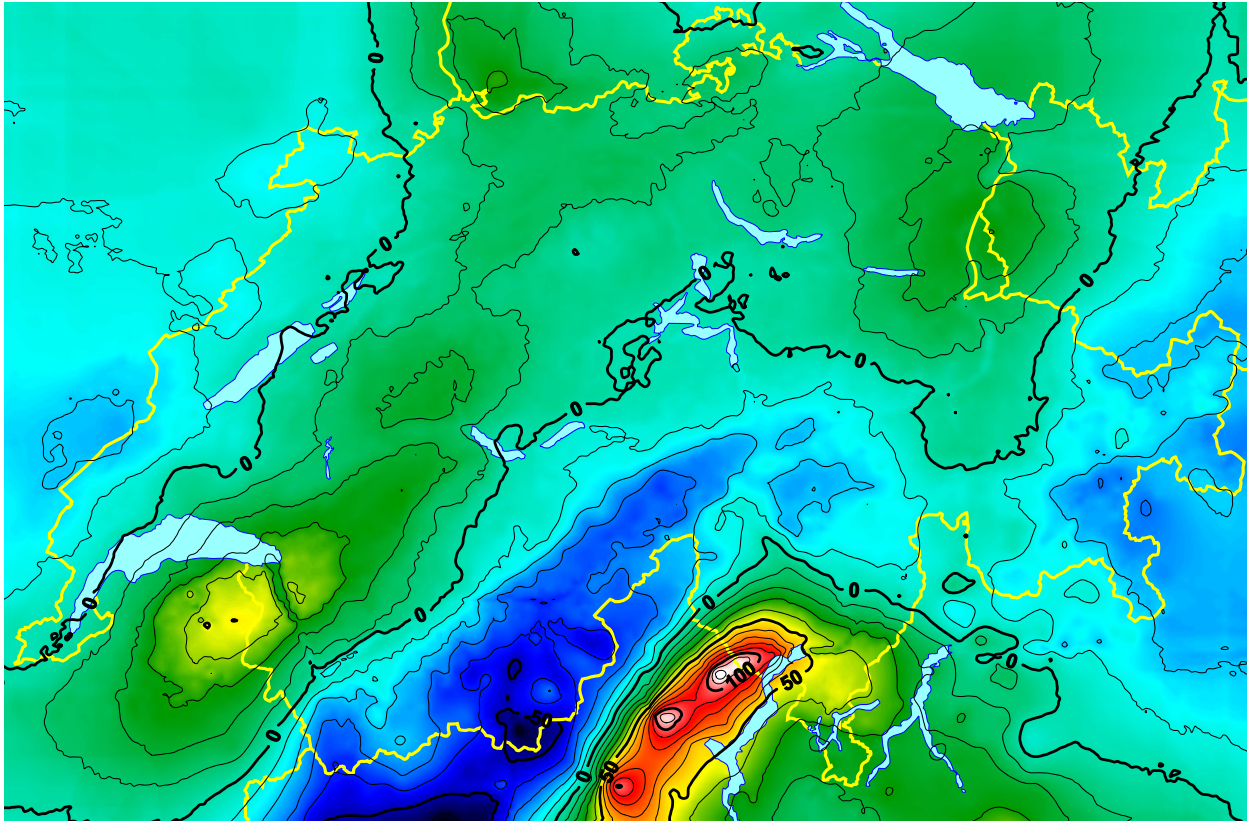


Abbildung 4-7: Reduzierte Schweredaten (Isolinienabstand 10 mGal)

## 5 Prädiktion des Co-Geoids

### 5.1 Berechnungsmethode

Als Methodik wurde grundsätzlich am Verfahren bei der Berechnung von CHGeo98 festgehalten. Diese Remove-Compute-Restore-Technik ist in [Marti, 1997] genauer beschrieben. Das heisst, dass die Geoidberechnung im Wesentlichen folgende drei Schritte umfasst: 1. Reduktion der Rohdaten um die Einflüsse der bekannten Massenmodelle; 2. Interpolation des Restfeldes mit Kollokation nach kleinsten Quadraten, sowie 3. Addition der vorher reduzierten Einflüsse auf Meereshöhe und auf Stationshöhe, was zum Geoidmodell, respektive dem zu Normalhöhen kompatiblen Quasigeoid führt.

Nach den in der Berechnung für CHGeo98 gemachten Erfahrungen wurde das Kovarianzmodell für die Kollokation nicht erneut untersucht, da es nur von geringem Einfluss ist. Es wurde wiederum das 2D-Markov-Modell 3. Ordnung gewählt. Einzig die Parameter der Kollokation ( $d_0$  und  $\sigma_0$ ) mussten erneut bestimmt werden, da wir nun andere und anders reduzierte Daten verwenden. Dies geschah wiederum über eine empirische Kovarianzbestimmung und eine nachträgliche Schätzung der beiden Parameter mit dem Programm DOSIG0.

Alle durchgeführten Varianten der Parameterschätzung ergaben dabei ähnliche Werte. Die charakteristische Distanz  $d_0$  betrug immer um die 40 km und das mittlere Signal einer Lotabweichungskomponente  $\sigma_0$  um die 5 Bogensekunden. Dies sind deutlich grössere Werte als bei CHGeo98, was aber aufgrund der unterschiedlichen Reduktion und der in CHGeo2004 grösseren Signale verständlich ist. Für die meisten Variantenrechnungen – und auch für die Schlusslösung – wurden diese Werte so eingeführt. Einige Tests mit abweichendem  $d_0$  (z.B. 30 km) haben gezeigt, dass sich die berechneten Geoidhöhen innerhalb der Schweiz um weniger als 1 cm ändern.

Die Prädiktion selber geschieht im Programm HITCOL. Als Ergebnis erhalten wir damit den Korrelationsvektor, die prädizierten Werte (Lotabweichungen, Schweren und Cogeoid-Höhen) auf den Stützpunkten, sowie die relative Standardabweichung einer Cogeoid-Höhe gegenüber einem Referenzpunkt (wir haben die Geostation Zimmerwald gewählt) auf den Stützpunkten und in einem regelmässigen Gitter. Gegenüber der Berechnung für CHGeo98 wurde das Programm so erweitert, dass auch die vollständige Varianz/Kovarianzmatrix zwischen den GPS/Nivellement-Punkten ausgegeben wird.

### 5.2 Variantenrechnungen

Es wurden verschiedene Varianten des Geoids berechnet. Diese unterscheiden sich insbesondere in der Art und Anzahl der verwendeten Messungen und in der Gewichtung dieser Daten. Einige wenige Versuche wurden auch mit der Variation der Parameter der Kollokation durchgeführt.

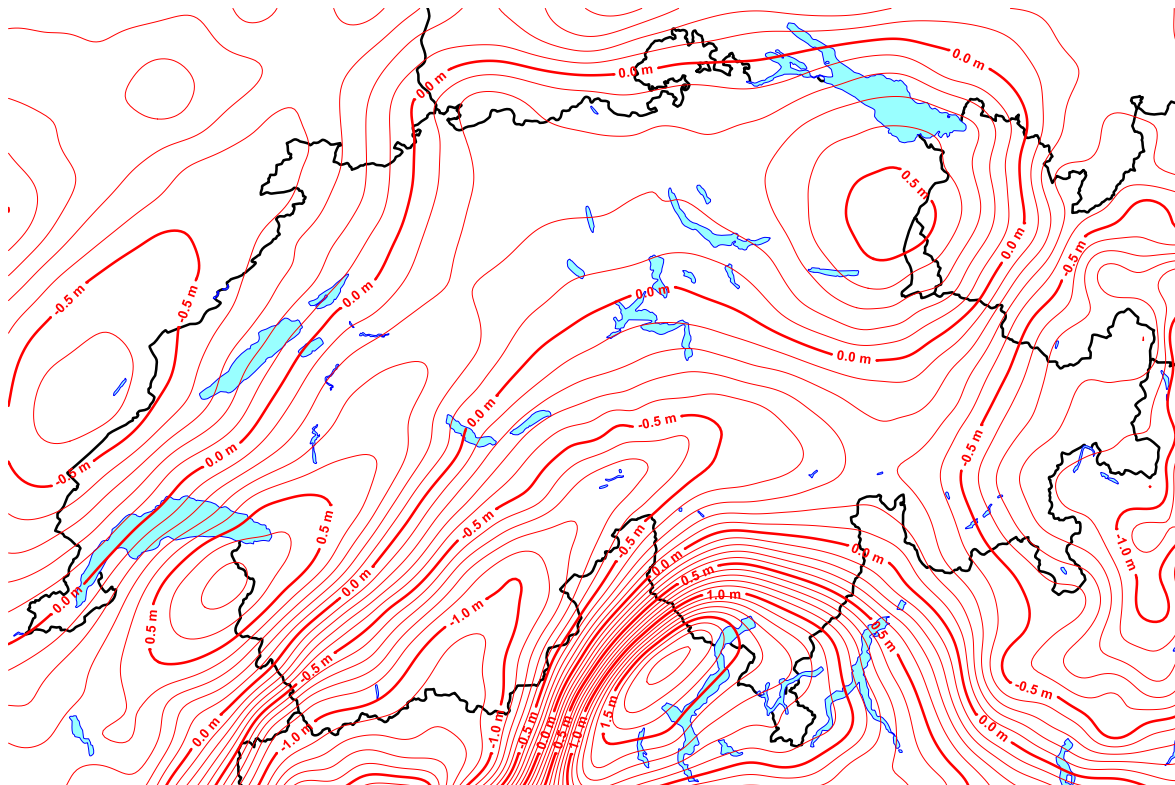
So wurden unter anderen folgenden Lösungen gerechnet:

- nur Schweren
- nur Lotabweichungen
- nur GPS/Nivellement
- Lotabweichungen und Schweren
- Lotabweichungen und GPS/Nivellement
- Schweren und GPS/Nivellement
- alle vorhandenen Daten mit Variation der Gewichtung der GPS/Nivellement-Messungen (gezwängt, 1 cm Standardabweichung, 3 cm Standardabweichung)
- alle vorhandenen Daten, aber Weglassen der Hälfte der GPS/Nivellement-Punkte

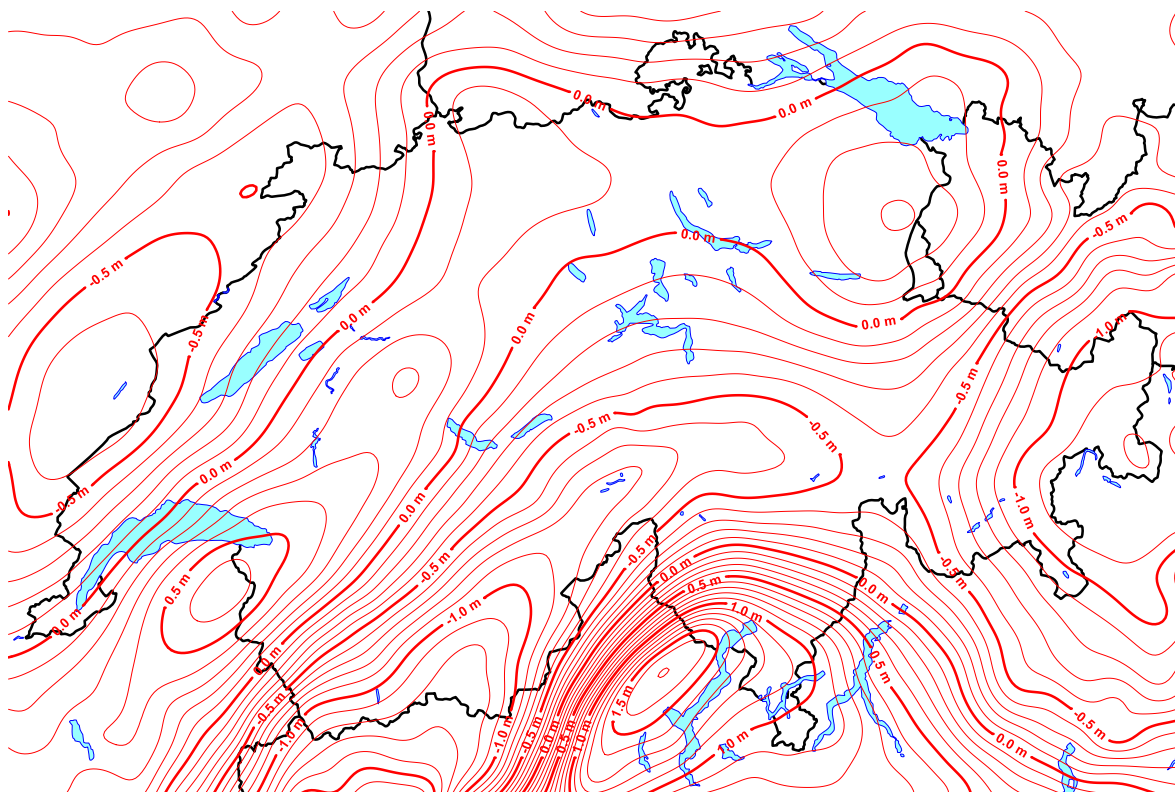
Als Ergebnis dieser Berechnungen erhalten wir

- Den Korrelationsvektor für die spätere Verwendung für die Prädiktion auf beliebigen Punkten
- Prädizierte Werte (Schweren, Lotabweichungen, Co-Geoidhöhen auf allen Stützpunkten (und daraus auch die verbleibenden Residuen oder „Verbesserungen“ der Messungen), sowie Standardabweichung der Co-Geoidhöhe relativ zu Zimmerwald auf diesen Punkten)
- Die Co-Geoidhöhen in einem regelmässigen Gitter von 1x1 km
- Die Standardabweichung der Co-Geoidhöhe relativ zu Zimmerwald in einem regelmässigen Gitter (wurde nicht für alle Varianten gerechnet)
- Die vollständige Varianz/Kovarianzmatrix zwischen den GPS/Nivellementpunkten (nicht für alle Varianten gerechnet)

Als Beispiele für die berechneten Varianten sind in den folgenden Abbildungen das Co-Geoid einer Lösung mit allen Beobachtungen (Abbildung 5-1) und dasjenige aus Schweren und Lotabweichungen (Abbildung 5-2) dargestellt.



**Abbildung 5-1:** Co-Geoid aus Schweren, Lotabweichungen und GPS/Nivellement



**Abbildung 5-2:** Co-Geoid aus Schweren und Lotabweichungen

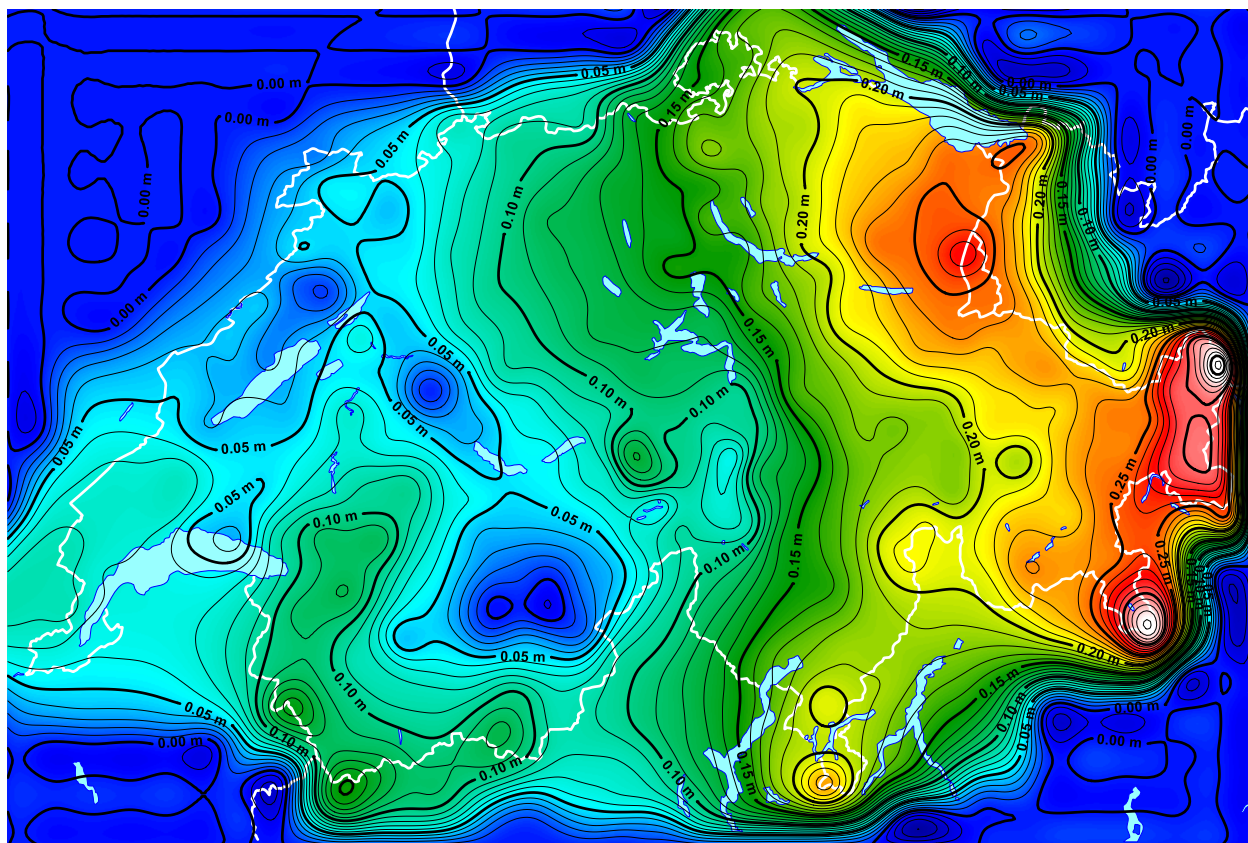
Beide Lösungen sehen auf den ersten Blick ziemlich ähnlich aus und zeigen folgende Hauptcharakteristiken. Der Bereich der Cogeoid-Höhen bewegt sich zwischen einem Minimum von -1.3 m im

südlichen Wallis und im Münstertal und einem Maximum von 1.5 m westlich von Locarno. Lokale Maxima befinden sich südlich des Lac Léman und in der Ostschweiz. Ein lokales Minimum ist über dem Jura zu finden. Das starke Signal in Norditalien und im Tessin ist eine Folge davon, dass der Ivreakörper nicht vor der Kollokation wegreduziert wurde. Das generelle Bild ist sehr stark korreliert mit den in Abbildung 4-7 dargestellten reduzierten Schweren.

Die Differenzen der beiden Lösungen sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Nun werden einige grössere Unterschiede sichtbar. In Zimmerwald sind die Differenzen 0, da auch in der Lösung „Astro+Schwere“ dort ein Lagerungspunkt eingeführt wurde. In weit von der Schweiz entfernten Gebieten gehen die Differenzen ebenfalls wieder auf 0, da die synthetischen GPS/Nivellement-Messungen (siehe Kapitel 2.4) in beiden Varianten in der Berechnung belassen wurden, um ein Abdriften der Lösung zu verhindern. Dies hat aber innerhalb der Schweiz keine Auswirkungen.

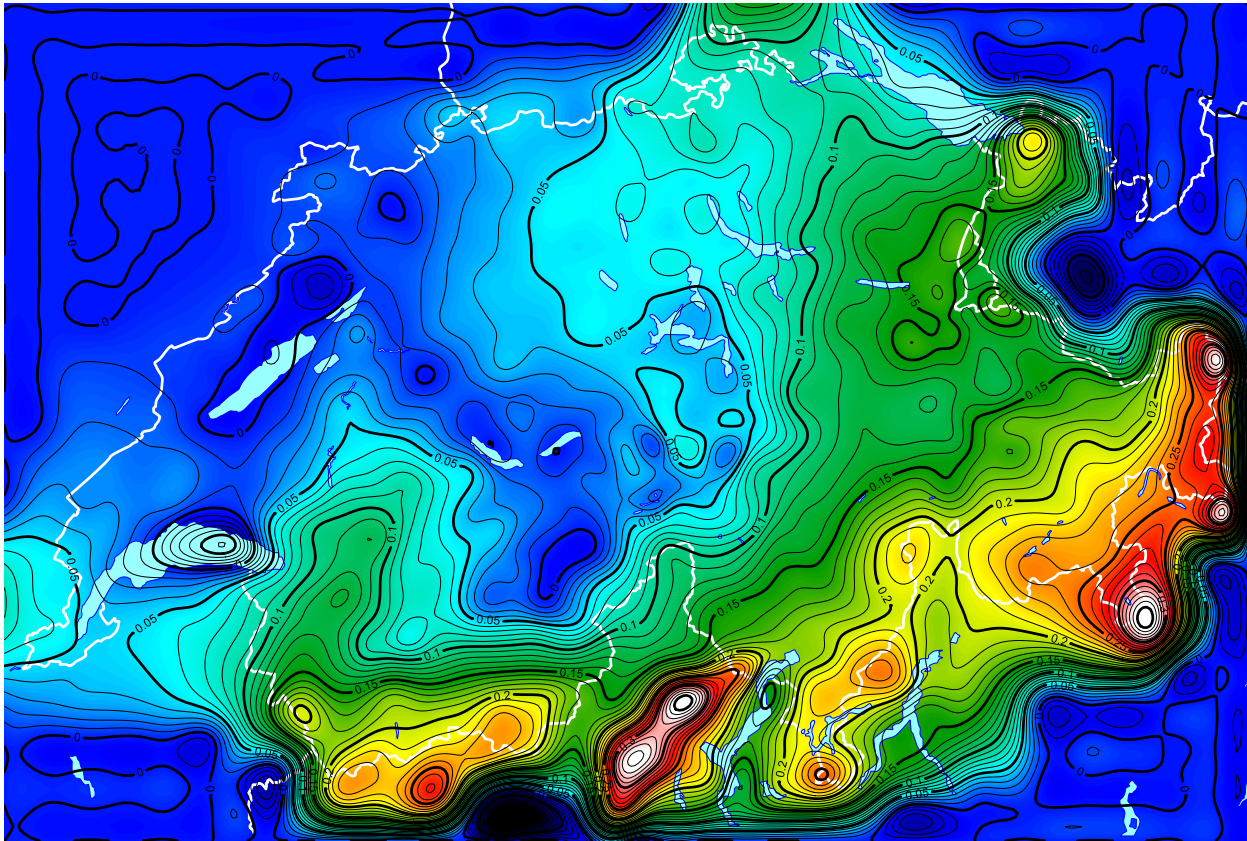
Alle übrigen Differenzen sind positiv und wachsen im Osten systematisch auf über 20 cm an. Aber auch gegen das Wallis wachsen die Differenzen auf über 10 cm an. Dies zeigt, dass zwischen GPS/Nivellement einerseits sowie Schweren und Lotabweichungen andererseits noch systematische Unterschiede bestehen, welche aber nicht einfach zu erklären sind. Diese Systematiken könnten bereits in den Messungen selber enthalten sein, wofür es aber bisher keine Indikation gibt. Oder sie könnten durch eine inkonsistente Reduktion der Daten entstehen (z.B. durch eine ungenügende Ausdehnung des topografischen Modells), aber auch dafür gibt es keine konkreten Hinweise.

Die Ursache dieser Inhomogenitäten liess sich bei der Berechnung von CHGeo2004 nicht eruieren. Für die Publikation des Geoids wurde aber eine Lösung gewählt, welche sich wesentlich auf die GPS/Nivellement-Messungen abstützt, um die Residuen auf diesen Punkten möglichst klein zu halten und mit dem Höhensystem LHN95 konsistent zu sein.



**Abbildung 5-3:** Differenz der Lösung aus allen Messungen („kombinierte Lösung“) und derjenigen nur aus Schweren und Lotabweichungen

Einige weitere Vergleiche von Lösungsvarianten sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 5-4 zeigt die Differenzen der kombinierten Lösung zu einer rein gravimetrischen Lösung (mit Zimmerwald als Lagerungspunkt). Das generelle Bild entspricht mehr oder weniger demjenigen aus Abbildung 5-3. Jedoch wachsen die Differenzen gegen Osten ein bisschen weniger stark an. Wir sehen aber auch hier die grossen Differenzen im Unterengadin und im Puschlav. Die grossen Differenzen im Ivreegebiet sind eine Folge davon, dass dort nur sehr wenige gravimetrische Messungen vorhanden sind und die Geoidform im Wesentlichen von den Lotabweichungen stammt.



**Abbildung 5-4:** Differenz der kombinierten gegenüber einer rein gravimetrischen Lösung

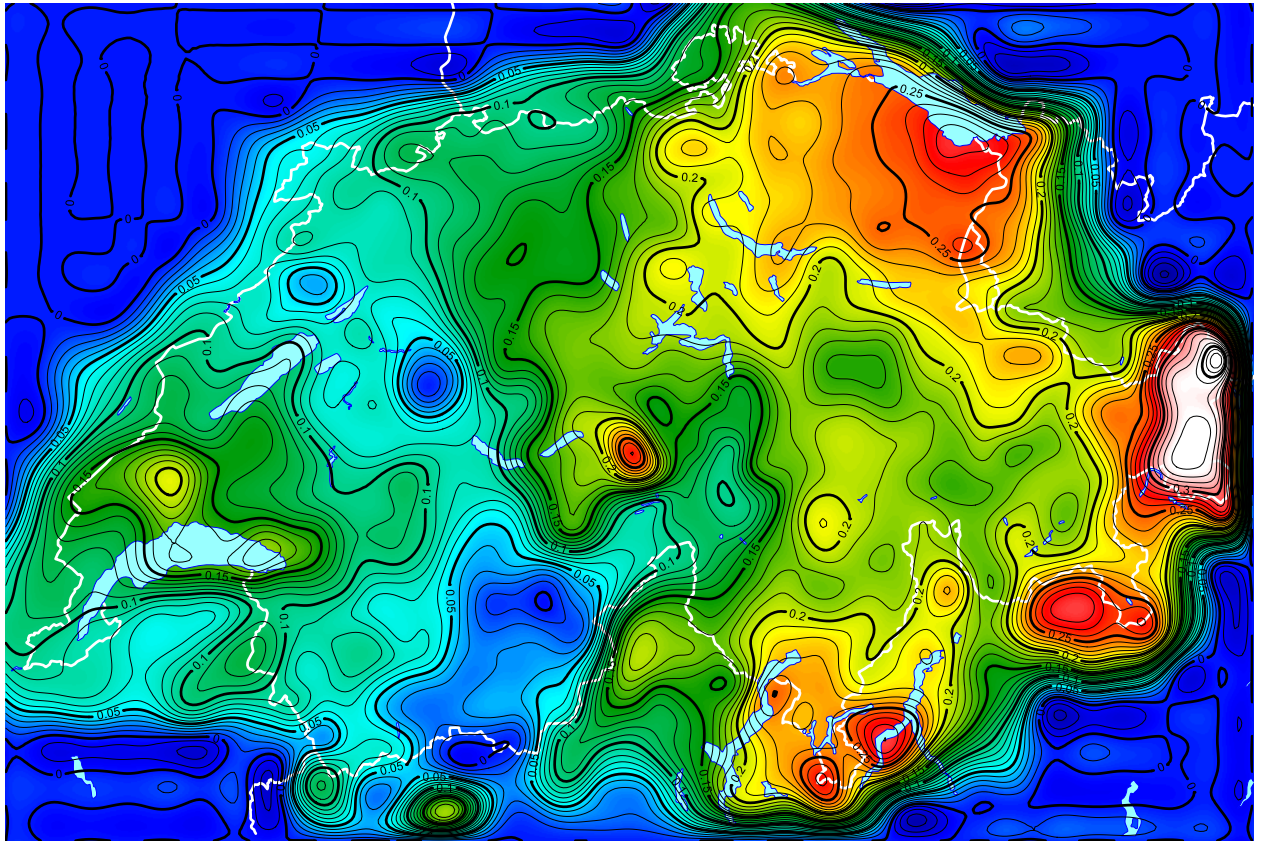
Die Differenzen zwischen einer kombinierten Lösung und einer rein astrogeodätischen Lösung (Abbildung 5-5) zeigen noch einmal dasselbe Grobbild, nämlich das Anwachsen der Unterschiede vor allem in Richtung Osten. Allerdings nehmen die Beträge grössere Werte an als in den oben beschriebenen Varianten. Im Unterengadin erreichen die Unterschiede mehr als 30 cm. Das lokale Maximum bei Innertkirchen konnte später auf eine problematische Lotabweichungsmessung in Gadmen zurückgeführt werden.

Abbildung 5-6 zeigt die Differenzen der kombinierten Lösung zu einer reinen Berechnung aus GPS/Nivellement. Hier sind die Unterschiede innerhalb der Schweiz sehr viel kleiner als in den vorherigen Vergleichen. Dies zeigt, dass die Grobform der kombinierten Lösung wesentlich von diesen Messungen festgelegt wird. Grössere Differenzen treten nur in Gebieten auf, in welchen keine GPS/Nivellement-Messungen vorhanden sind. Innerhalb der Schweiz sind dies vor allem die Jungfrauregion, einige südliche Seitentäler des Wallis oder das Maggiatal und das Centovalli. Aber dort gibt es auch keine Linien des Landesnivellements. Es wäre deshalb wichtig, in solchen Gebieten genügend andere Messungen für die Geoidbestimmung zur Verfügung zu haben, was aber meist nicht der Fall ist. Lokale Maxima oder Minima zeigen auch, wo es sich lohnen könnte, noch weitere GPS/Nivellement-Punkte zu bestimmen (falls dies wegen der Linienführung des Landesnivellements überhaupt möglich ist). Eine Möglichkeit wäre z.B. zwischen Bern und Biel ungefähr in der Gegend um Schüpfen, eine bei St.Brais in den Freibergen, eine andere wäre bei St.Gingolph am südöstlichen Ende des Lac Léman oder eine weitere zwischen Ponte Tresa und Monteggio.

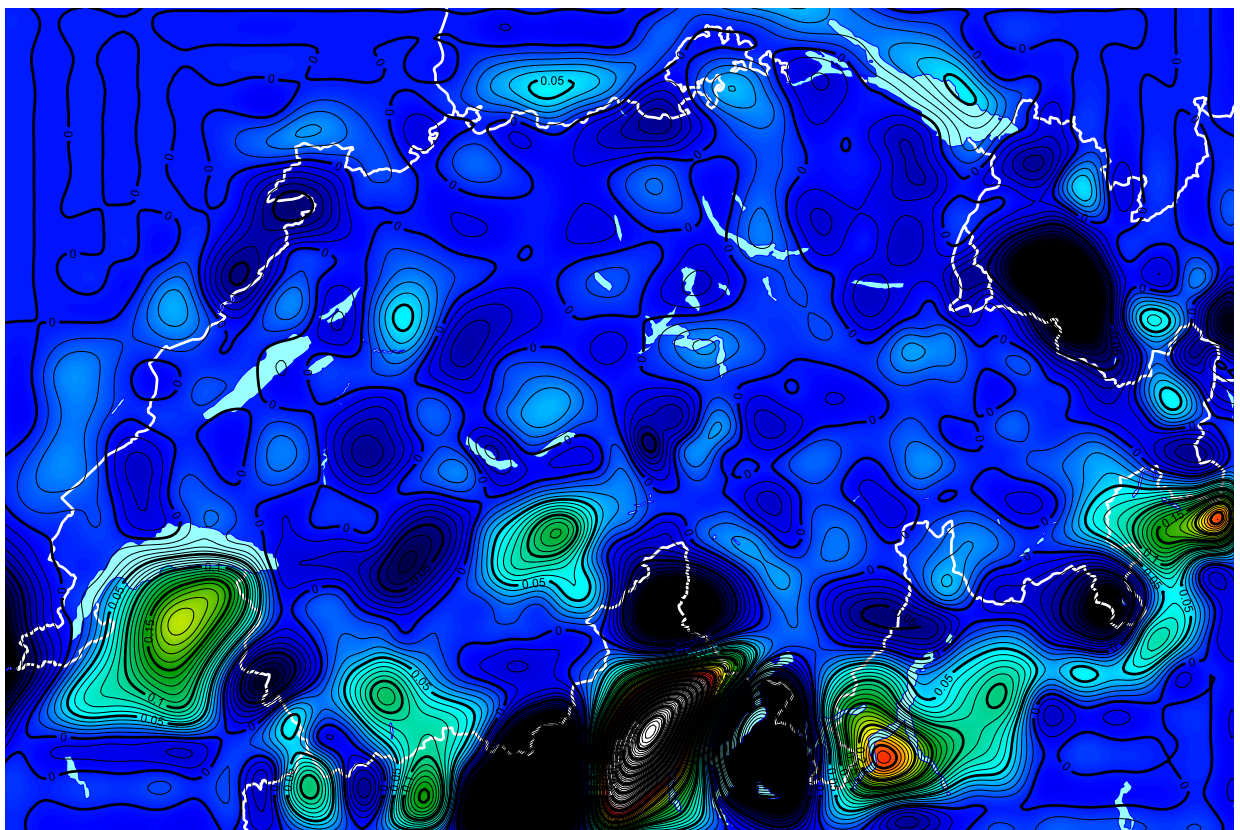
Abbildung 5-7 zeigt die Differenzen zwischen einer kombinierten Lösung, bei welcher die GPS/Nivellement-Werte fixiert wurden und einer, bei welcher sie mit einer Standardabweichung von 3 cm eingeführt wurden. Hier sieht man ebenfalls ein Auseinanderdriften der beiden Lösungen gegen Osten, aber natürlich viel weniger stark. Diese Differenzen stimmen sehr gut mit den GPS/Nivellement-Residuen aus CHGeo98 überein, welches ja mit dieser weichen Lagerung gerechnet wurde. Die grossen Differenzen im Unterengadin von über 20 cm können mit einer nur leicht gezwängten GPS/Nivellement-Messung nicht abgefangen werden.

Abbildung 5-8 zeigt schliesslich noch die Differenzen einer kombinierten Lösung mit allen Daten und einer, bei welcher nur ca. die Hälfte der GPS/Nivellement-Punkte verwendet wurden. Hier sind die Differenzen in der Regel kleiner als 1 cm. Dies bedeutet, dass wir in der Schweiz im Allgemeinen eine ausreichende Dichte an GPS/Nivellementpunkten haben.

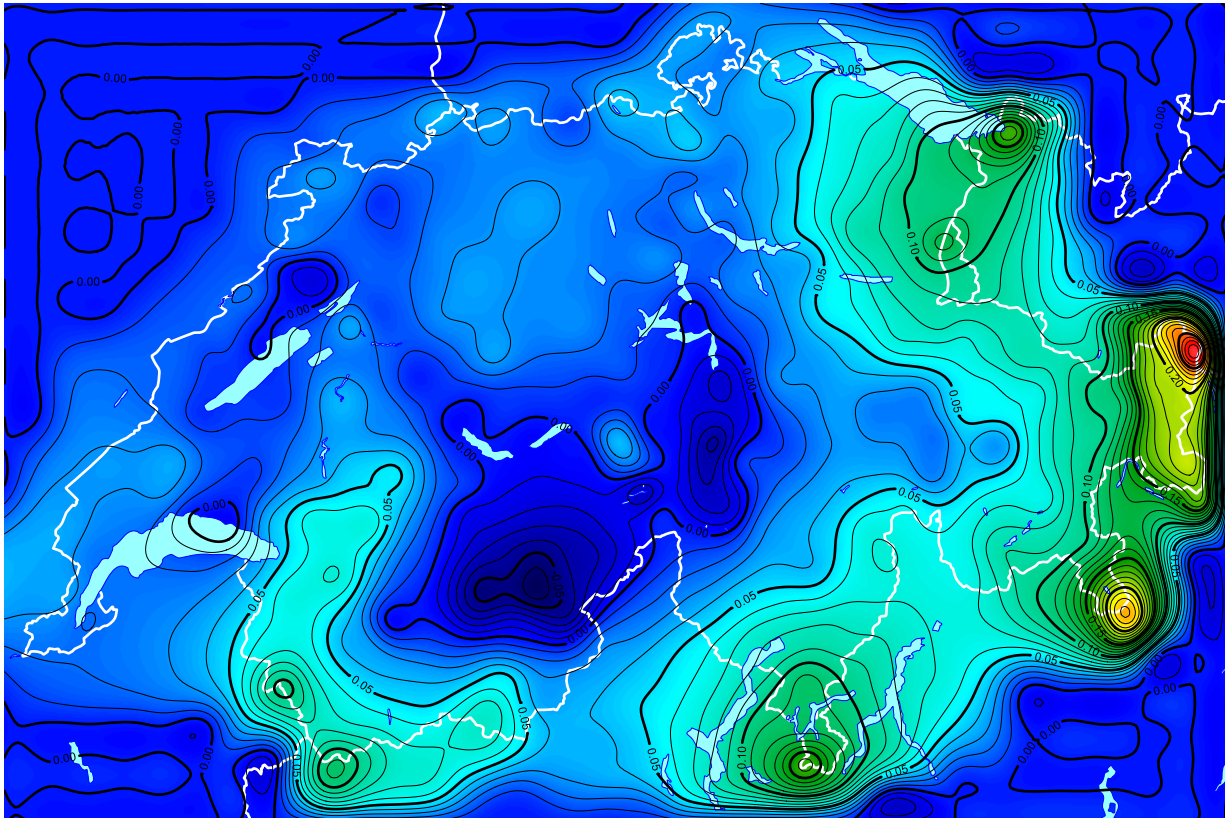




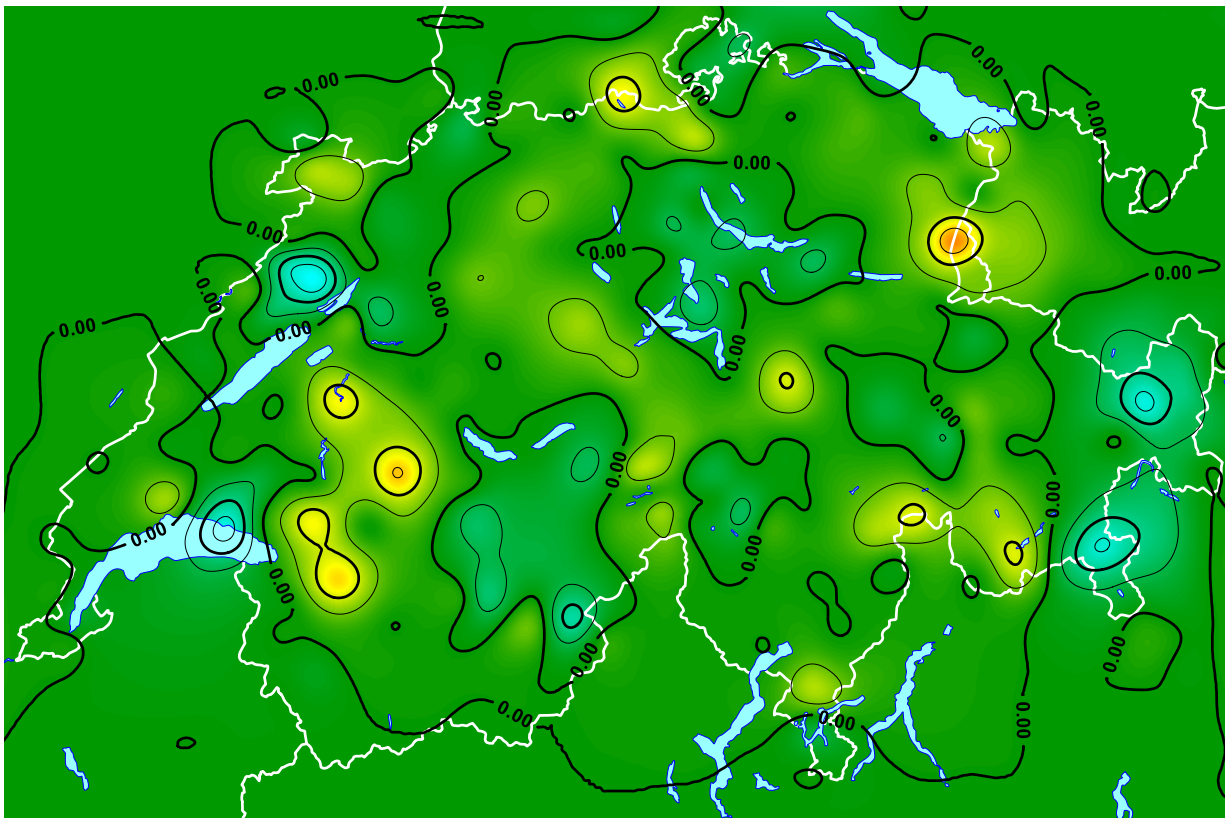
**Abbildung 5-5:** Differenz der kombinierten gegenüber einer rein astrogeodätischen Lösung



**Abbildung 5-6:** Differenz der kombinierten Lösung und einer reinen GPS/Nivellement-Lösung



**Abbildung 5-7:** Differenz der kompletten Lösung mit fixierten GPS/Nivellement-Messungen und einer kompletten Lösung mit einer weichen Lagerung der GPS/Nivellement-Messungen (Standardabweichung: 3 cm)



**Abbildung 5-8:** Differenzen der kompletten Lösung mit fixierten GPS/Nivellement-Messungen und einer Lösung, bei welcher nur ca. die Hälfte der GPS/Nivellement-Daten verwendet wurde (Isolinienabstand 5 mm)

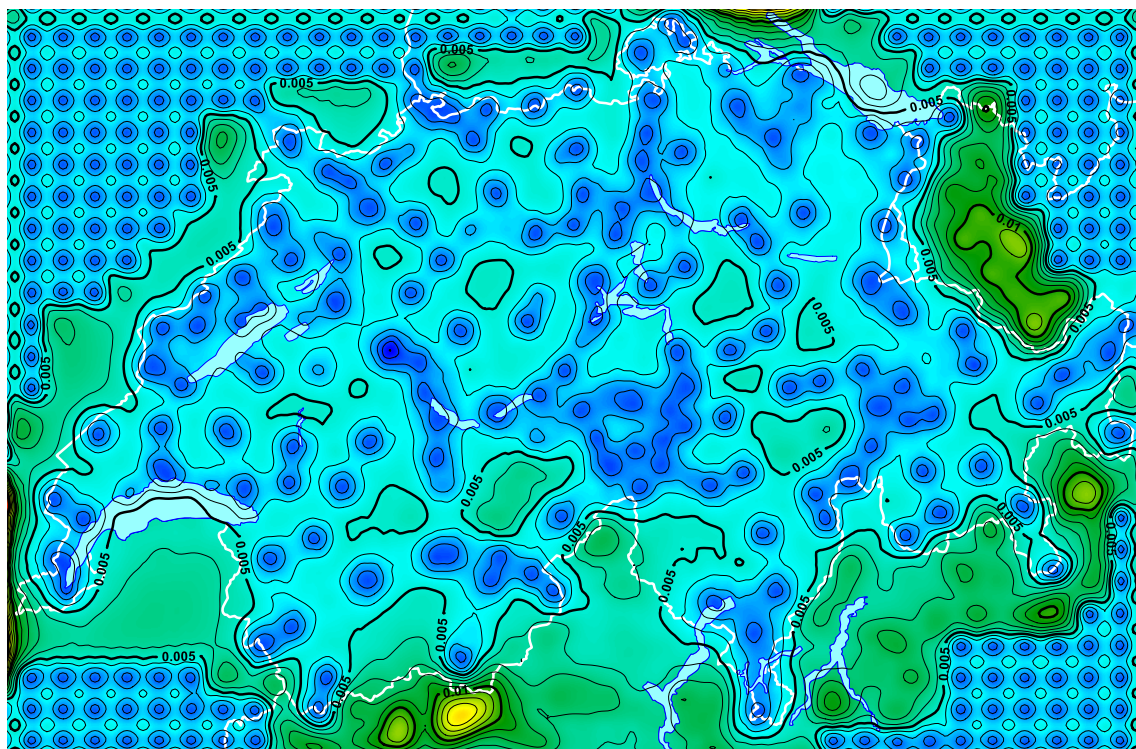
### 5.3 Genauigkeit der präziierten Lösungen

Mit der Kollokation nach kleinsten Quadraten lässt sich auch die Genauigkeit eines präziierten Wertes bestimmen. So wurde für die verschiedenen Varianten für die Geoidhöhen jeweils die relative Genauigkeit zu Zimmerwald in einem regelmässigen Gitter berechnet. Diese ausgewiesenen Genauigkeiten sind jedoch meist sehr optimistisch, da systematische Inkonsistenzen zwischen den einzelnen Datensätzen praktisch ohne Einfluss bleiben. So lassen sich zum Beispiel grossräumige Trends in den Differenzen sehr gut durch sehr kleine – allerdings systematische – Verbesserungen der Lotabweichungen verstecken.

In Abbildung 5-9 sind diese berechneten relativen Genauigkeiten für eine kombinierte Lösung mit praktisch fixierten GPS/Nivellement-Messungen dargestellt. Bei jedem GPS/Nivellement-Punkt sinkt dabei die Genauigkeit praktisch auf 0. Dazwischen wächst die Standardabweichung um einige Millimeter an, erreicht aber kaum einmal 5 mm. Diese Gebiete mit den grössten Standardabweichungen liegen meist in Regionen ohne Landesnivellement (Jungfraugebiet, Napf, Valsertal, ...). Es gibt nur wenige mögliche Gegenden, wo zusätzliche GPS/Nivellement-Punkte eventuell eine Verbesserung bringen könnten. Es sind dies zumeist dieselben, welche schon im vorherigen Kapitel erwähnt wurden (Freiberge, St.Gingolph, Maggiatal, ...). Als einzig neuer nützlicher Standort für eine GPS/Nivellement-Station ergibt sich aus dieser Abbildung vielleicht ein Punkt am nördlichen Ende des Lac de Gruyères. Durch die Einführung der synthetischen GPS/Nivellement-Punkte ausserhalb der Schweiz ergibt sich dort dieses auffällige regelmässige Muster.

Diese fehlerfreien GPS/Nivellement-Messungen sind natürlich nicht realistisch. Deshalb sind in Abbildung 5-10 auch die relativen Fehler einer kombinierten Lösung mit einer weichen Lagerung von 3 cm dargestellt. Die synthetischen Punkte im Ausland wurden dabei auch weggelassen. Hier fällt auf, dass die Genauigkeit um Zimmerwald relativ rasch auf 5 mm ansteigt. Danach bleibt sie aber im ganzen Perimeter praktisch konstant, und fast die ganze Schweiz liegt innerhalb von  $\pm 1$  cm. Ausserhalb des Gebietes mit vorhandenen Messungen nimmt dann die Genauigkeit sehr rasch ab. Aber auch diese ausgewiesene Genauigkeit ist wegen der vorhandenen Systematiken in den Messungen noch viel zu optimistisch, wie die im vorherigen Kapitel dargestellten tatsächlichen Differenzen der Lösungen zeigen.

In Abbildung 5-11 ist schliesslich noch die Genauigkeit einer rein astrogeodätischen Lösung dargestellt. Dort sieht man, dass eine rein astrogeodätische Geoidbestimmung mit den vorhandenen Messungen in der Schweiz mit einer Genauigkeit von ca. 3 cm möglich ist. Dies ist ein signifikant tieferer Wert als der in [Marti, 1997] ausgewiesene, was eine Folge der 2003 mit den digitalen Zenitkameras gemessenen hochgenauen Lotabweichungen ist.



**Abbildung 5-9:** Relativer Fehler der kombinierten Lösung mit gezwängten GPS/Nivellement-Punkten (Isolinienabstand 1 mm)

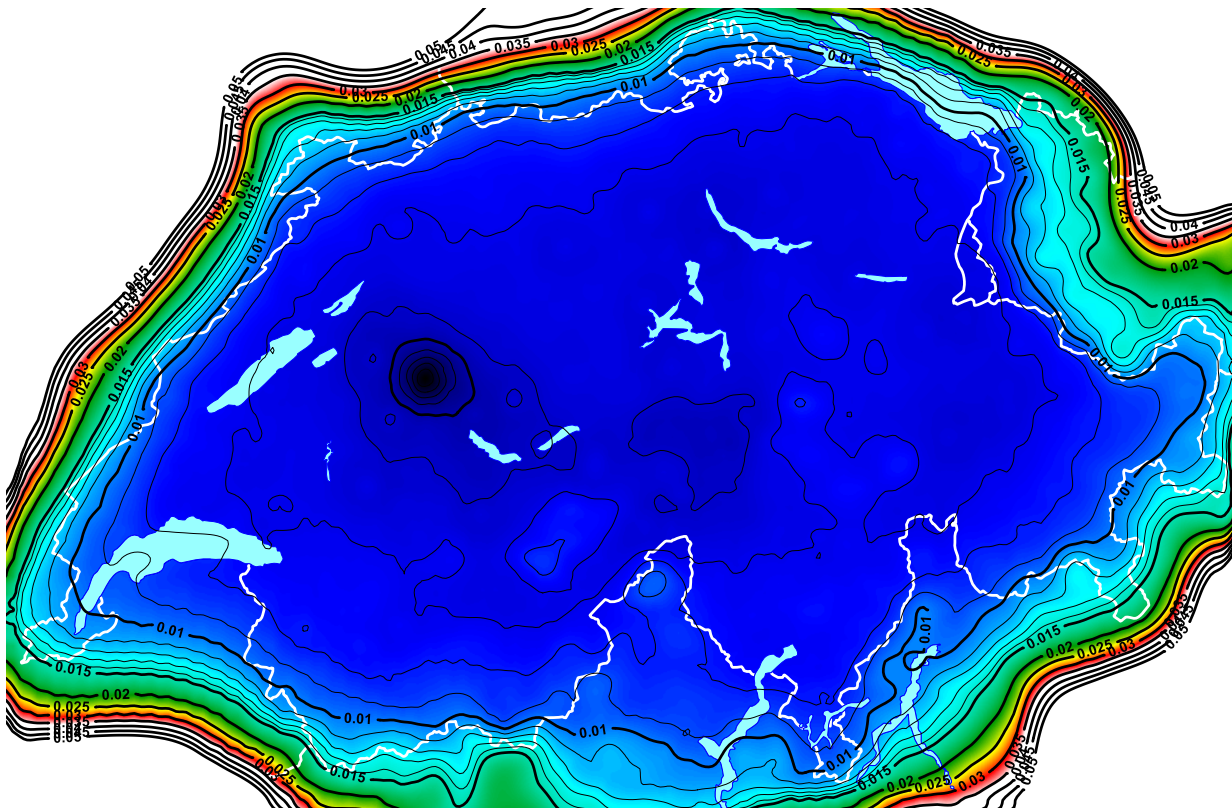


Abbildung 5-10: Relativer Fehler einer kombinierten Lösung mit einer Genauigkeit der GPS/Nivellement-Punkte von 3 cm (Isolinienabstand 1 mm)

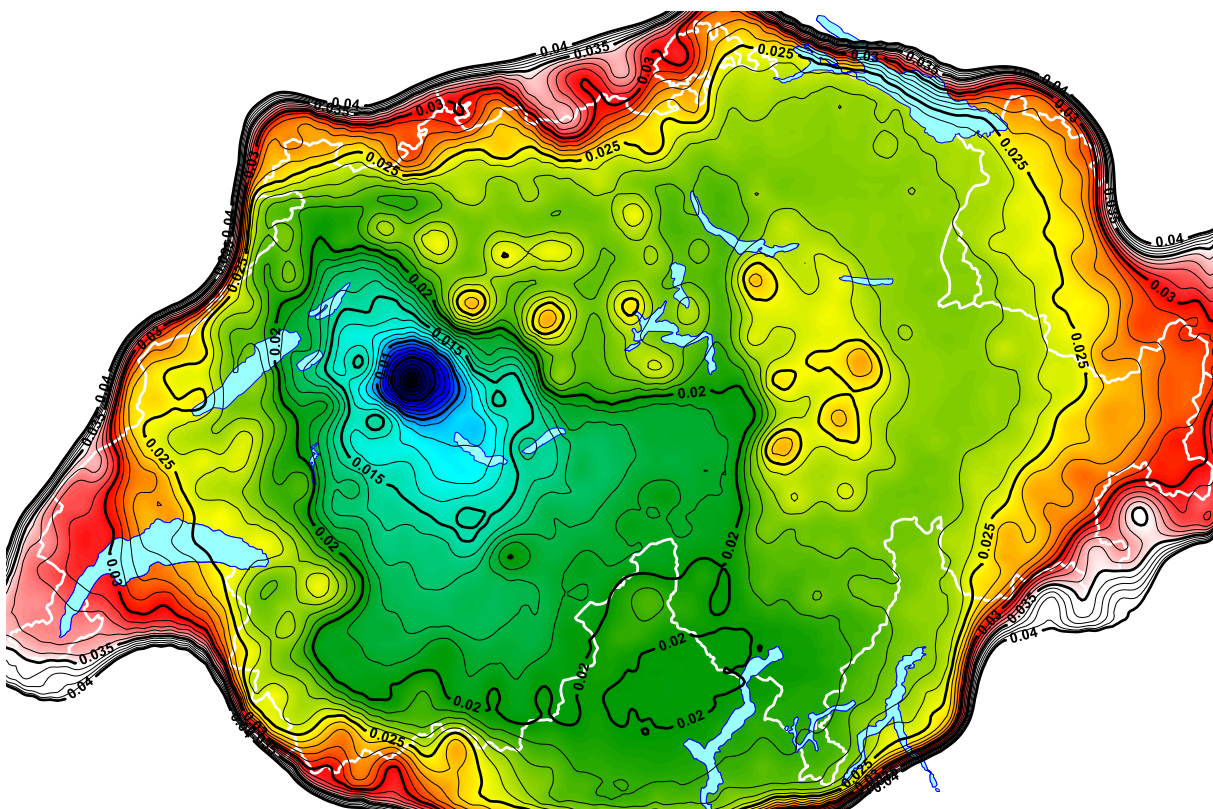


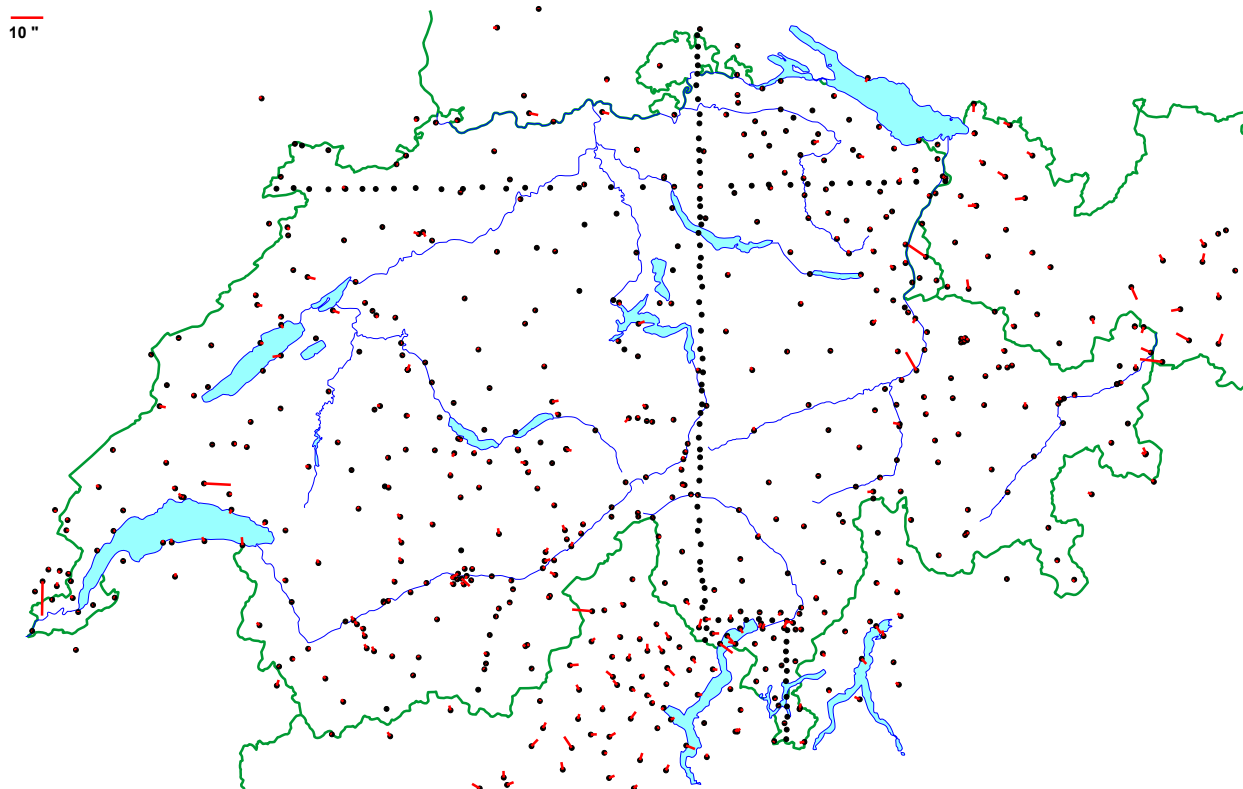
Abbildung 5-11: Relativer Fehler der rein astrogeodätischen Lösung (Isolinienabstand 5 mm)

## 5.4 Die gewählte definitive Lösung des Co-Geoids

Für die Benutzung des Geoidmodells durch die Allgemeinheit musste eine der berechneten Varianten als die zu publizierende Schlusslösung gewählt werden. Als Hauptkriterium dabei diente die Nützlichkeit für den Endbenutzer, welcher mit GNSS-Messungen Höhen bestimmen will. Für diesen Benutzer ist ein konsistentes Höhensystem wichtig, bei welchem die Differenz zwischen ellipsoidischer Höhe und Geoidhöhe exakt die orthometrische Höhe ergibt. Deshalb wurde diejenige Lösung als Schlusslösung gewählt, bei welcher auf die guten GPS/Nivellement-Messungen gezwängt wurde.

## 5.5 Die Residuen der Beobachtungen

Die nach der Kollokation noch verbleibenden Residuen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 5-12 zeigt die verbleibenden Restklaffen an den Lotabweichungen. Man sieht, dass die Lotabweichungen in der Regel sehr gut (besser als 1 Bogensekunde) approximiert werden. Ebenfalls sichtbar sind einige grobe Ausreisser. Eine Systematik in den Residuen ist in diesem Massstab nicht zu erkennen. Deshalb wurde dieselbe Information noch fünffach vergrössert in Abbildung 5-13 dargestellt. Nun sind auch die kleineren Restklaffen deutlicher zu sehen. Auf den ersten Blick sind auch hier keine grossen Systematiken sichtbar, aber es gibt doch Regionen, bei welchen alle Residuen in dieselbe Richtung zeigen. Ein Beispiel ist südlich des Zürichsees mit einer systematischen Nord-Süd-Verkipfung in der Grössenordnung von  $0.6''$ . Auch im Gebiet zwischen Sierre und Zweisimmen ist ein Trend zu erkennen. Die in den Variantenrechnungen auftretende West-Ost-Verkipfung ist aber mit diesen Residuen nicht zu erklären.



**Abbildung 5-12:** Residuen der Lotabweichungen der kombinierten Lösung

Die in Abbildung 5-14 dargestellten Residuen der GPS/Nivellement-Messungen zeigen in erster Linie die Zwängung der Lösung auf diese Punkte. Alle Punkte mit gut bestimmten GPS-Höhen wurden fixiert und erhalten praktisch keine Verbesserungen. Nur bei sehr nahe beieinander liegenden Punkten können Residuen von einigen mm entstehen. Die grösseren Residuen betreffen allesamt Punkte mit eher schlecht bestimmten GPS-Höhen. Bei den meisten davon handelt es sich um die ursprünglichen exzentrischen Nivellement-Anschlüsse der LV95-Hauptpunkte, welche nur mit L1-Empfängern in kurzen GPS-Sessions beobachtet wurden. Aber auch auf diesen Punkten betragen die verbleibenden Residuen selten mehr als 1-2 cm, was sicher als befriedigendes Resultat bezeichnet werden darf.

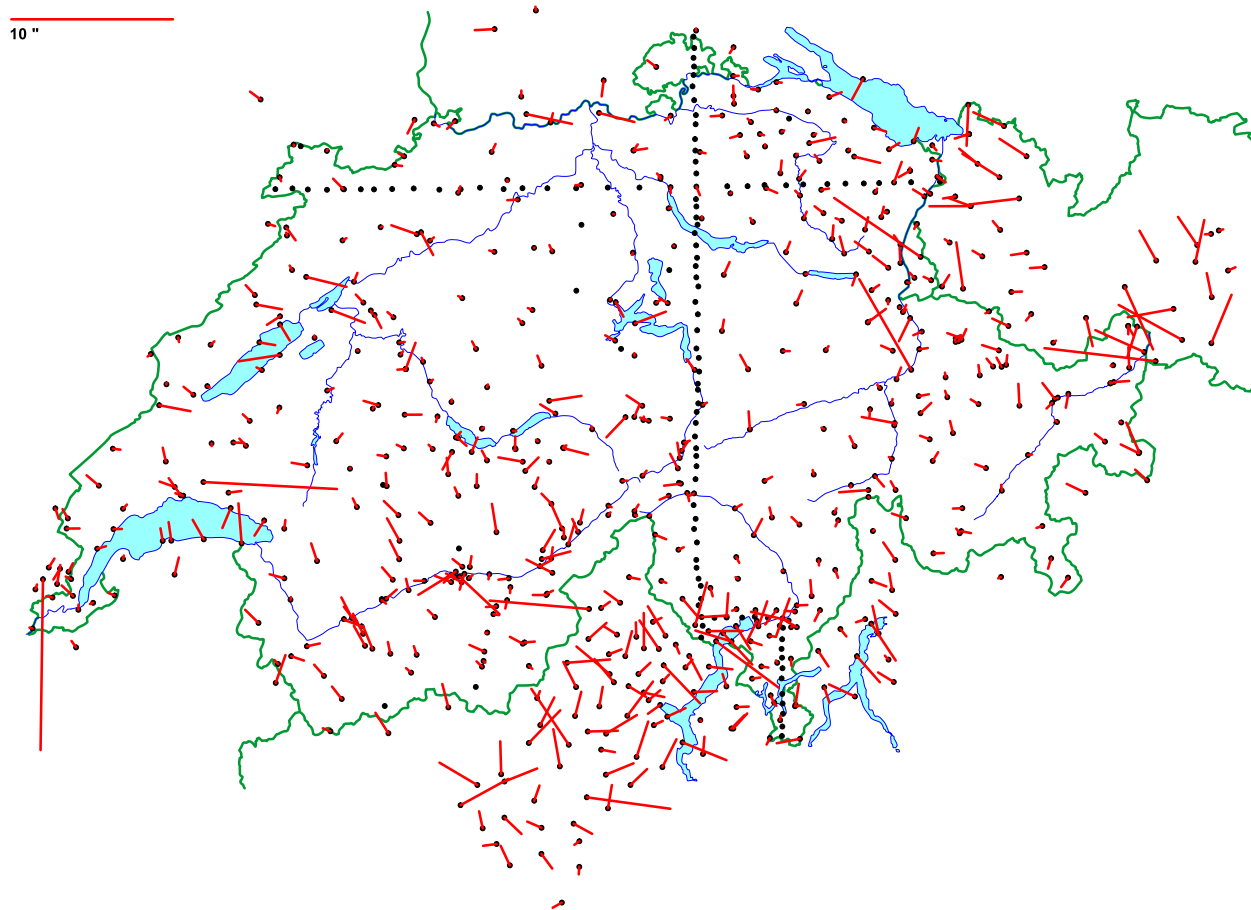


Abbildung 5-13: Vergrösserte Darstellung der Residuen der Lotabweichungen

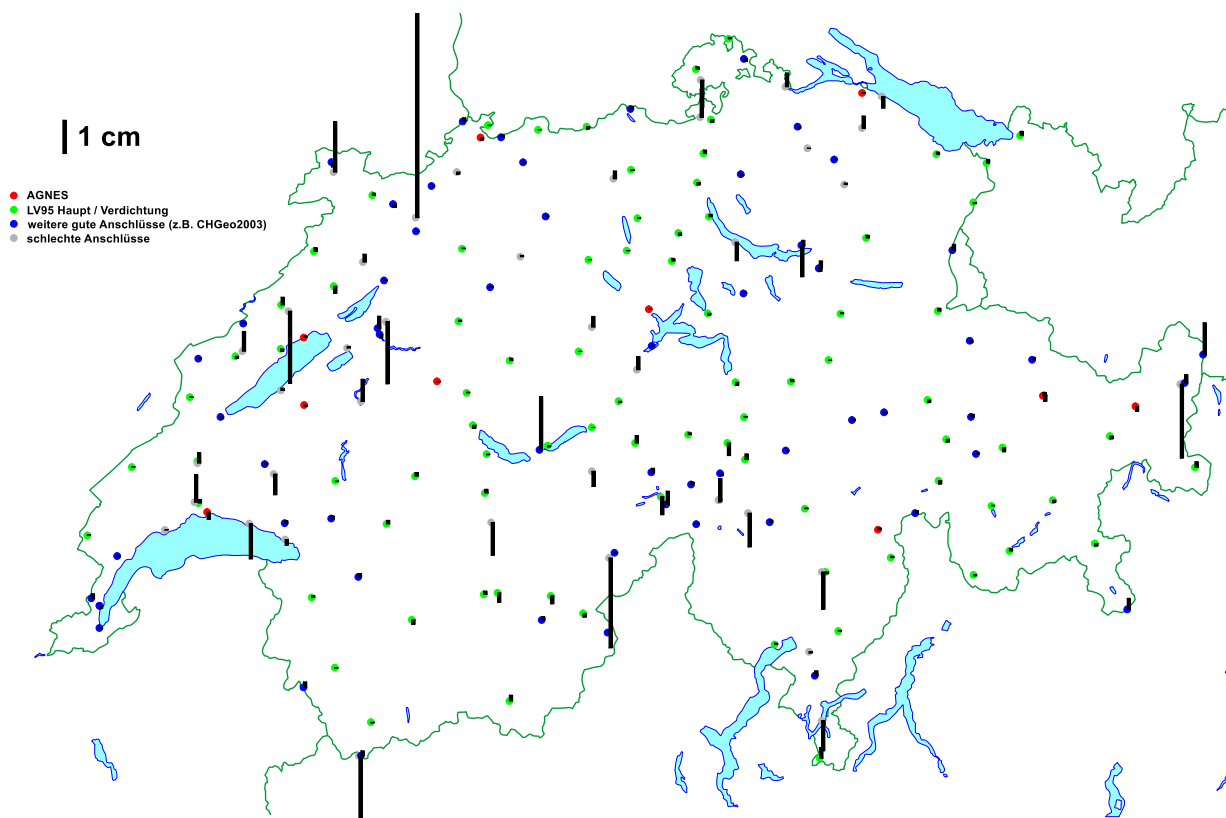


Abbildung 5-14: Residuen der GPS/Nivellement-Punkte der kombinierten Lösung

In Abbildung 5-15 sind schliesslich noch die Residuen in den auf ein Gitter reduzierten Schwerewerten dargestellt. Im grössten Teil des Mittellandes und des Jura betragen diese  $\pm 1$  mGal (oder  $\pm 2$  mGal, falls man es ein bisschen strenger betrachtet), was sicher eine genügend gute Approximation ist. Im Alpenraum und am Rand des Perimeters sind die Residuen jedoch um einiges grösser und können Werte von knapp über 20 mGal erreichen. Auch sind die Residuen nicht zufällig verteilt, sondern es gibt Regionen wo negative oder positive Werte vorherrschen. Die Schweren im Alpenraum werden also durch CHGeo2004 nicht mit hoher Genauigkeit repräsentiert. Deshalb wird für eine genaue Schwereinterpolation auch nicht CHGeo2004 verwendet, sondern ein separates Programm, welches direkt mit den reduzierten Schwerewerten auf den Messpunkten arbeitet. Dieses in QUAWIRK integrierte Modul erlaubt Schwereinterpolationen auch im Alpenraum mit einer Genauigkeit von 1-2 mGal.

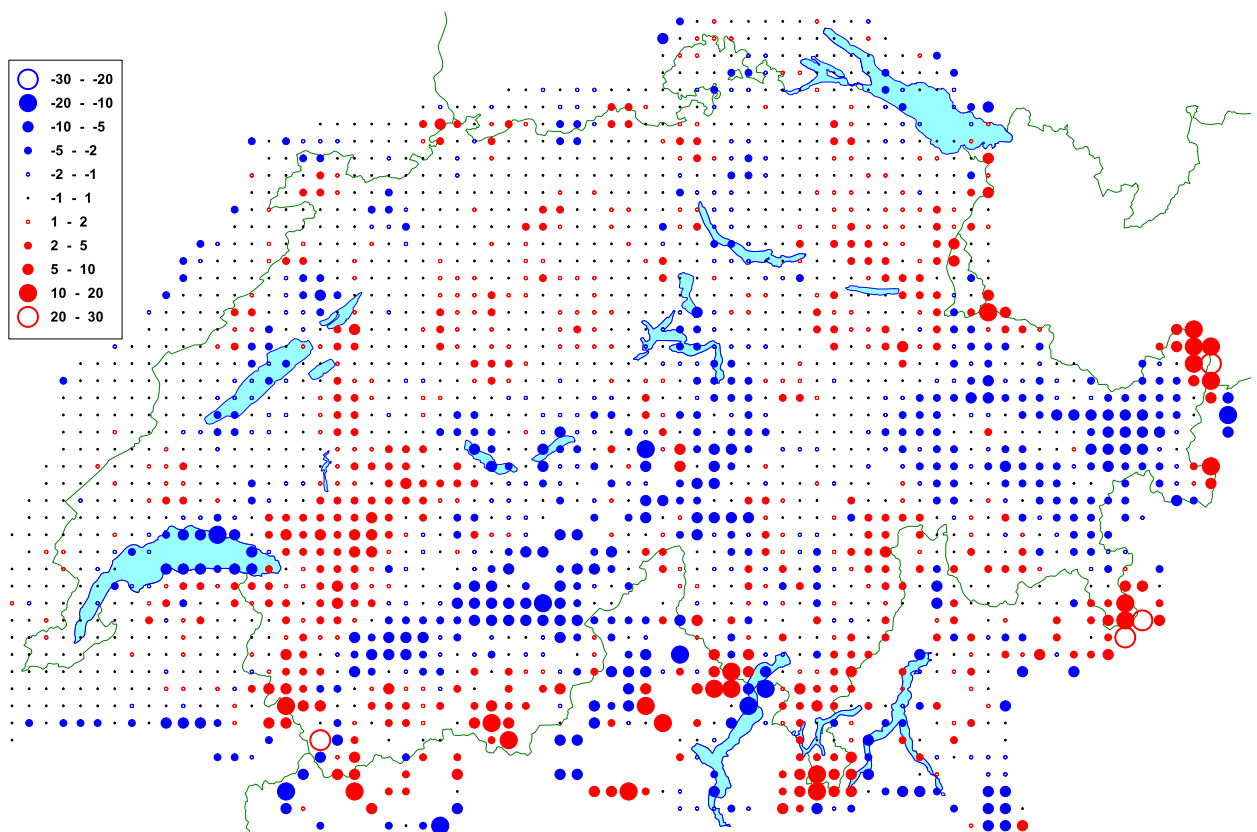


Abbildung 5-15: Schwereresiduen (in mGal)

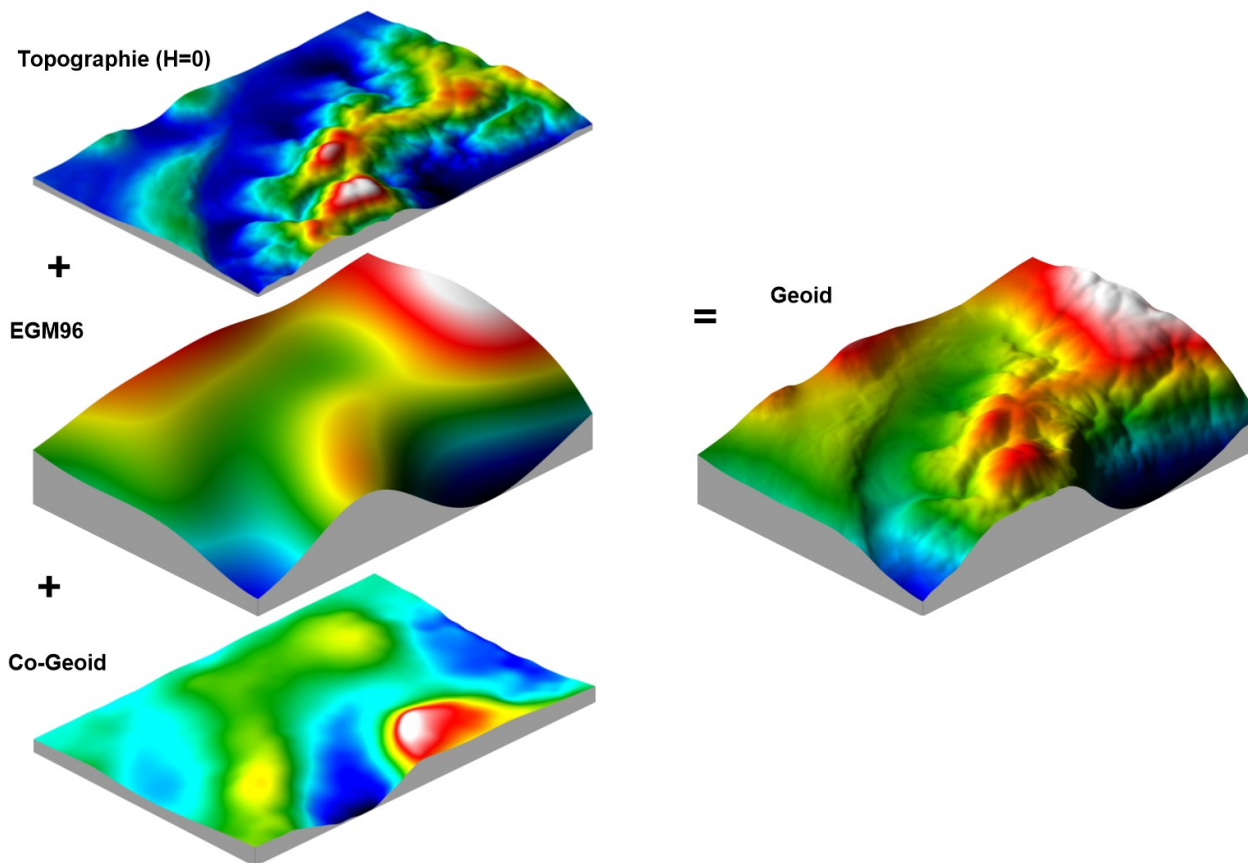
## 6 Berechnung des Geoids und des Quasigeoids

Nachdem wir das Co-Geoid des Restfeldes per Kollokation berechnet haben, erhalten wir das Geoid und das Quasigeoid, indem wir die zuvor reduzierten Wirkungen der Massenmodelle wieder addieren.

Durchgeführt wurden diese Berechnungen in einem regelmässigen 1x1-km-Gitter in LV95 und gleichzeitig auch in einem 30x30"-Gitter in ETRS89. Auf allen diesen Punkten benötigt man also die prädizierten Werte aus der Kollokation, die berechneten Geoidanteile des globalen Modells sowie die Wirkung der einzelnen Massenmodelle.

Für die Berechnung des Geoids müssen zum Co-Geoid nur die Wirkung des EGM96 sowie die Wirkung der residualen Topografie (gerechnet auf Meereshöhe) addiert werden. Illustriert ist dies in der folgenden Abbildung 6-1, wo noch einmal ersichtlich ist, dass die grobe Form aus dem globalen Modell, die mittleren Wellenlängen aus der Prädiktion und die Feinstrukturen aus dem Topografiemodell stammen.

Die Wirkung des EGM96 beträgt in der Schweiz zwischen -6 und +5 m (relativ zum Schweizer Bessel-Ellipsoid); aus der Prädiktion erhalten wir Werte zwischen -1.8 und +1.8 m und die Wirkung der Residualtopografie ergibt noch Anteile zwischen -1 und +2 m.

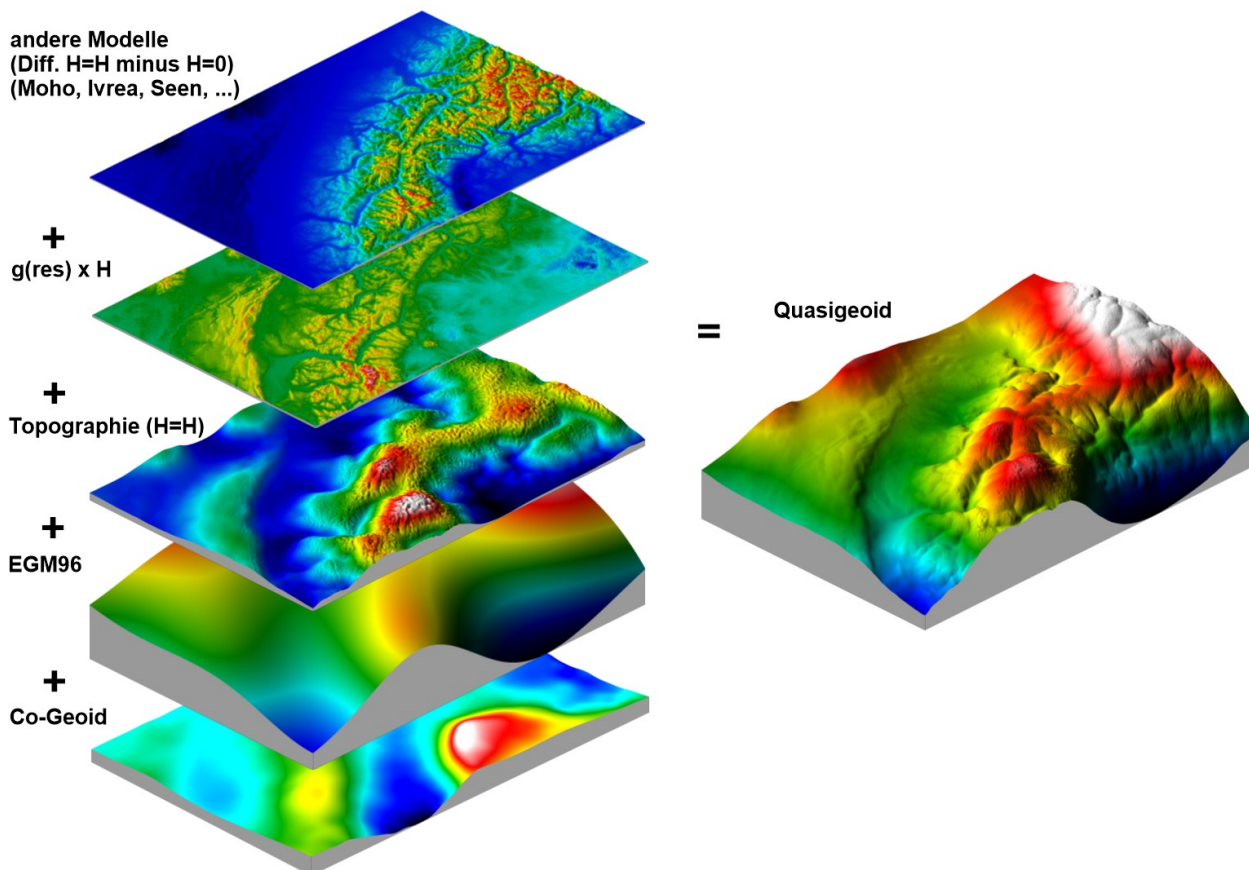


**Abbildung 6-1:** Restore des Geoids

Für die Berechnung des Quasigeoids oder von Höhenanomalien (Abbildung 6-2), welches kompatibel zu Normalhöhen ist, ist die Berechnung leicht anders als beim Geoid: Zunächst muss die Wirkung der Residualtopografie auf Terrainhöhe berechnet werden. Dies ergibt ungefähr gleich grosse Werte wie bei der Berechnung des Geoids, aber sehr viel mehr hochfrequente Anteile. Dazu addiert werden jetzt noch die Anteile der übrigen Massenmodelle als Differenz der Wirkungen auf Terrainhöhe und auf Meereshöhe (-14 bis +60 cm) und der in Kapitel 4.5 erwähnte Anteil der Residualschwere multipliziert mit der Höhe (Bereich von -20 bis +30 cm), welche beide stark mit der Topografie korreliert sind.

Natürlich lassen sich auch Lotabweichungen und Schweren auf jedem beliebigen Punkt rechnen. Dazu müssen zu den prädizierten Werten aus der Kollokation einfach die Wirkungen des EGM96 und der zuvor reduzierten Massenmodelle wieder hinzugezählt werden.





**Abbildung 6-2:** Restore des Quasigeoids

In den folgenden Abbildungen sind die Geoid- und Quasigeoidhöhen in ETRS89 und in CH1903+ dargestellt. Eine Unterscheidung zwischen LV03 und LV95 lohnt sich nicht. Das Geoidraster mit einer Auflösung von 1 km kann einfach durch Anbringen des Koordinatenoffsets von 2 Mio / 1 Mio vom einen ins andere System transformiert werden. Bei verschiedenen Endkunden werden sowohl das Modell in CH1903+ als auch dasjenige in ETRS89 benötigt. Je nachdem zu welchem Zeitpunkt in einer Koordinatentransformation das Geoid angebracht wird, ist das eine oder das andere Modell zu wählen.

Durch die Wahl des Referenzsystems CH1903+ oder ETRS89 ergibt sich in erster Linie ein Offset in der Grössenordnung von 50 Metern. Es verursacht aber auch eine generelle Verkippung. Während das Geoid in CH1903+ (Abbildung 6-3) vom Genfersee zum Bodensee kontinuierlich steigt, nehmen die Geoidhöhen in ETRS89 (Abbildung 6-4) ab. Im Vergleich der Abbildung 6-5 mit Abbildung 6-4 erkennt man, dass das Quasigeoid sehr viel stärker von der Topografie beeinflusst ist und deshalb auch schlechter zu interpolieren ist als das Geoid.

In Abbildung 6-6 ist noch die Differenz zwischen Quasigeoid und Geoid dargestellt. Diese Differenz nimmt Unterschiede von knapp negativen Werten (-12 cm) im Ivreegebiet bis ca. +55 cm in den Walliser und Bündner Alpen an. Der Unterschied ist in erster Linie verursacht durch die Topografie und die Schwereanomalien. Eine gute Näherung für die Berechnung ist das Produkt aus Meereshöhe und Bouguer-Anomalie, falls eine konstante Dichte der Topografie angenommen wird. Deshalb ist in dieser Abbildung auch der Ivreakörper sehr gut sichtbar (einziges Gebiet mit positiven Bouguer-Anomalien).

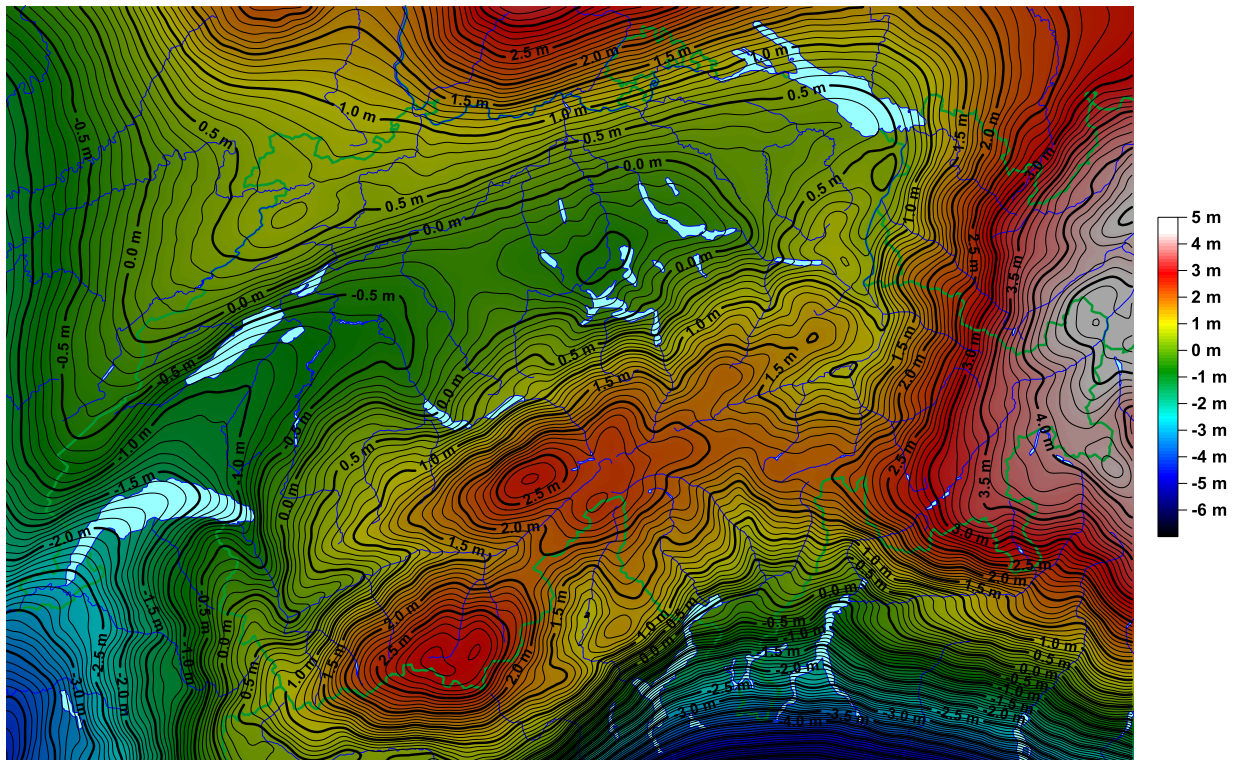


Abbildung 6-3: Geoidmodell CHGeo2004 im Schweizer Bezugssystem CH1903+

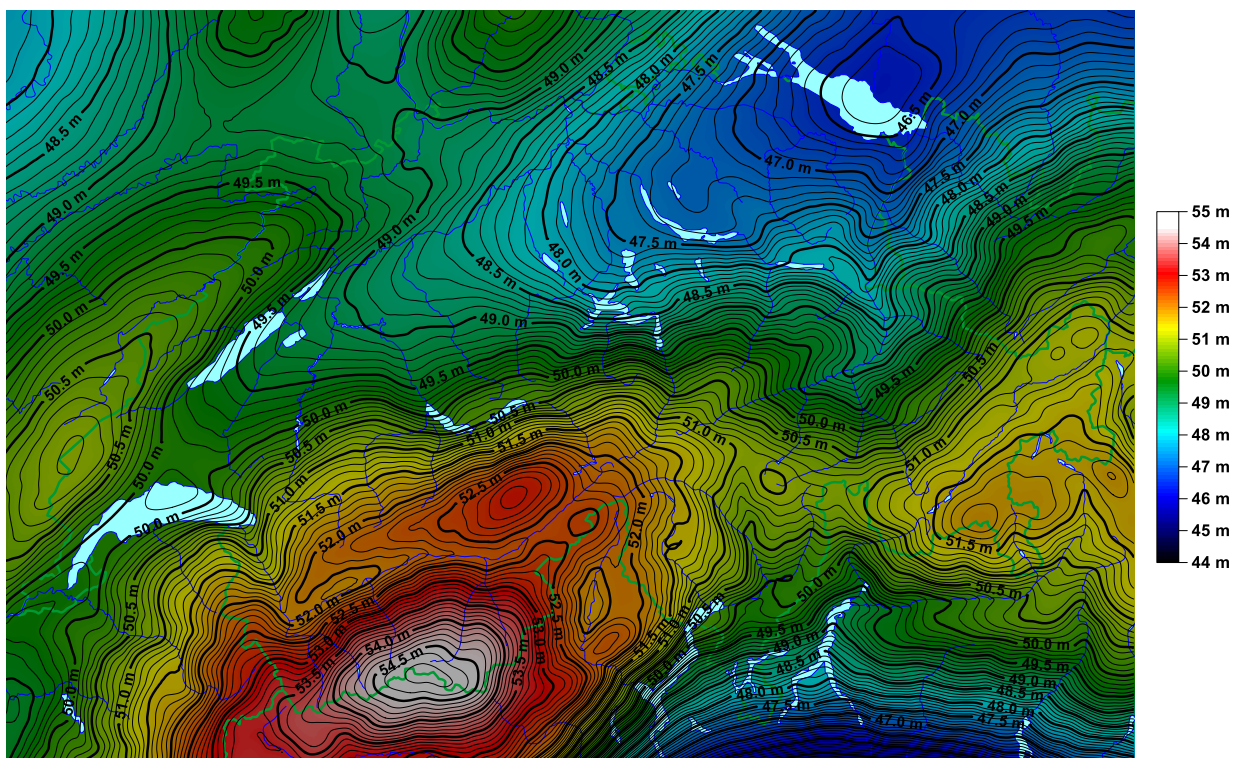


Abbildung 6-4: Geoidmodell CHGeo2004 im Bezugssystem ETRS89 = CHTRS95

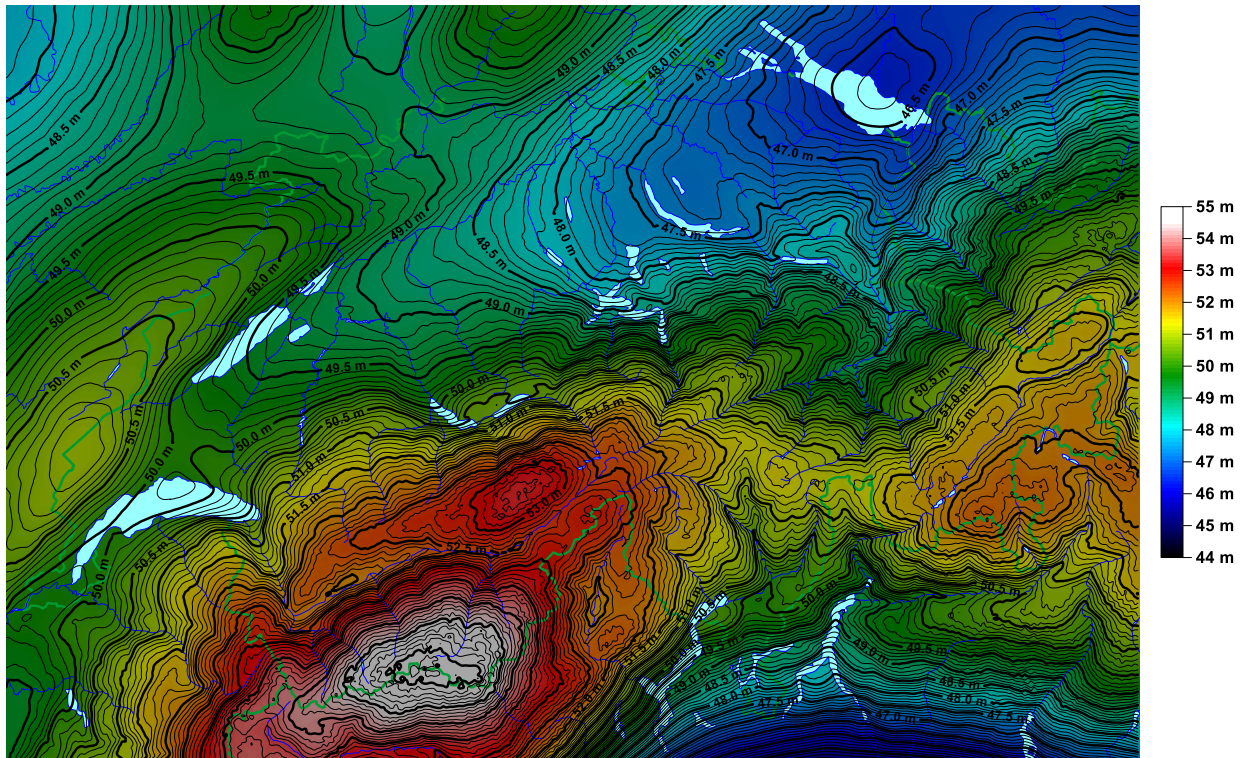


Abbildung 6-5: Quasigeoid CHGeo2004 in ETRS89

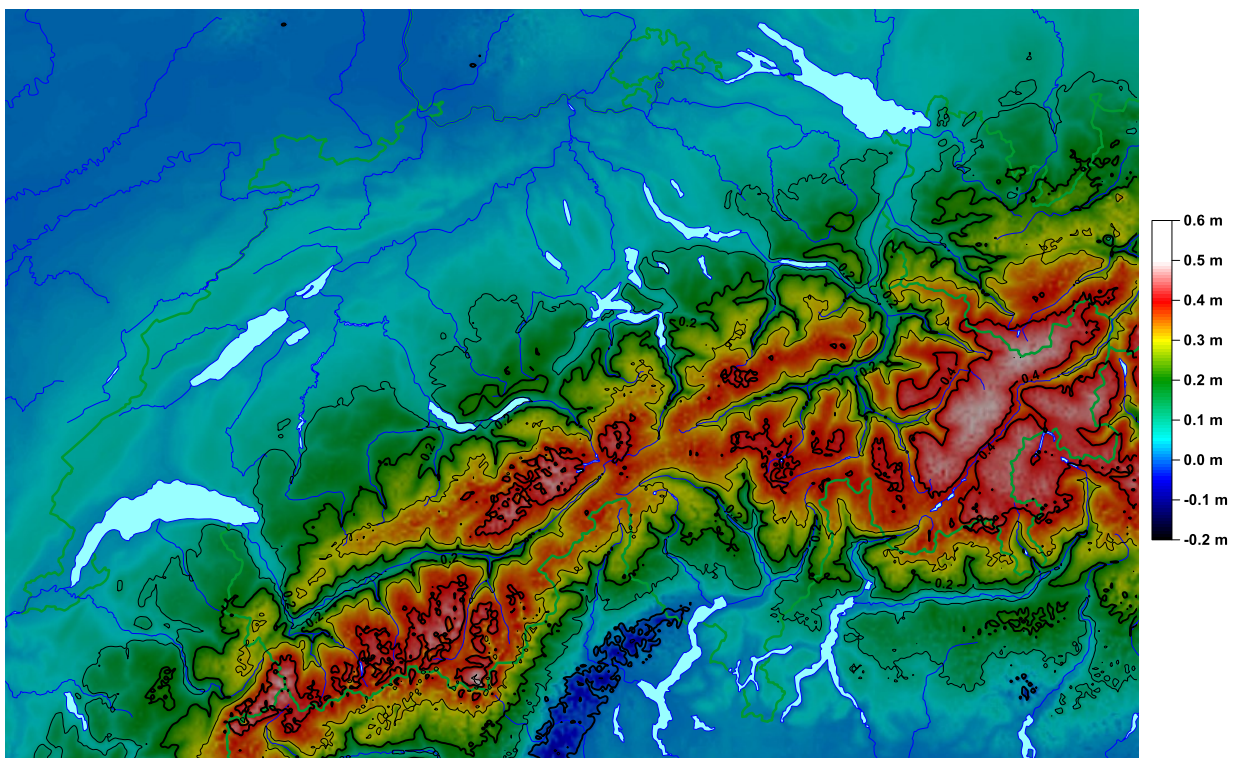


Abbildung 6-6: Unterschied Quasigeoid minus Geoid

## 7 Vergleich mit CHGeo98

In Abbildung 7-1 ist der Unterschied zwischen den Geoidmodellen CHGeo98 und CHGeo2004 dargestellt. Im grössten Teil des Mittellandes stimmen die beiden Modelle besser als  $\pm 4$  cm überein. Nur in wenigen Gebieten (z.B. Jungfrauregion, Puschlav, südlichstes Wallis) erreichen die Differenzen Werte von über 10 cm. Sehr markant ist der grosse Unterschied im Unterengadin von ca. 25 cm. Ausserhalb der Schweiz werden die Differenzen aufgrund der fehlenden Stützung in CHGeo98 sehr rasch grösser und erreichen Beträge im Meter-Bereich.

Diese Differenzen haben mehrere Ursachen. Die wichtigsten davon sind die Zwängung der GPS/Nivellement-Messungen in CHGeo2004, die neuen Lotabweichungsmessungen, aber auch die modifizierten Massenmodelle und die Methode der Reduktion der Messungen auf Meereshöhe.

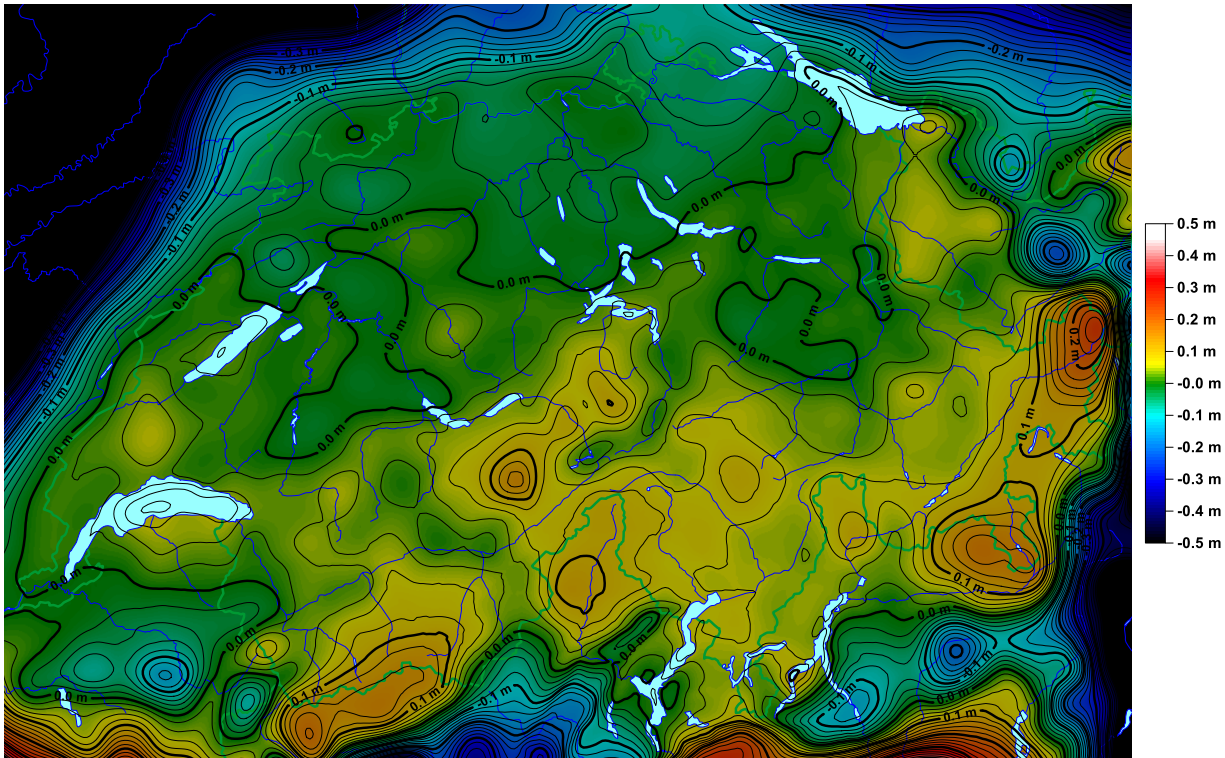


Abbildung 7-1: Unterschiede CHGeo2004 minus CHGeo98 (Isolinienabstand 2 cm)

## 8 Die GPS/Nivellement-Residuen

Das Hauptziel bei der Berechnung von CHGeo2004 war ein konsistentes Höhensystem, bei welchem ellipsoidische Höhen minus Geoid exakt orthometrische Höhen ergeben. Deshalb wurden auch die GPS/Nivellement-Messungen in der publizierten Lösung streng gezwängt.

Die ursprüngliche Idee war es aber, die GPS/Nivellement-Residuen auf die 3 Datensätze (GPS, Nivellement und Geoidmodell) gewichtet zu verteilen und somit eine von uns so genannte „C-Lösung“ (C für combined) zu produzieren. Bei dieser C-Lösung sollten also die verbleibenden Residuen auf die einzelnen Datensätze folgendermassen verteilt werden:

$$res_{tot} = v_{GPS} + v_{niv} + v_{geoid}$$

wobei die  $res_{tot}$  die „beobachteten“ GPS/Nivellement-Residuen (GPS/Nivellement-Messungen minus Geoidmodell) und die  $v$  die jeweiligen Anteile der einzelnen Datensätze sind. Für die Gewichtung könnte nun einfach die Standardabweichung der Datensätze auf den Punkten verwendet werden. Dies funktioniert aber wegen der hohen Korrelationen zwischen Nachbarpunkten, insbesondere beim Nivellement aber auch beim Geoidmodell, nicht befriedigend. Deshalb müssen die vollständigen Varianz-Kovarianz-Matrizen (Qxx-Matrix) eingeführt werden. Diese sind für alle 3 Datensätze vorhanden. Für das Geoid wird diese in HITCOL berechnet. Die Q-Matrix der GPS-Messungen kann aus dem SINEX-File extrahiert werden. Konkret wurde die Information der GPS/Nivellement-Punkte aus einem .COVLB-File der Gesamtlösung mit dem Programm `ext_qxxgps` extrahiert und ins lokale Referenzsystem transformiert. Für die Qxx-Matrix des Nivellements kann im Programm KINEPOT die vollständige Kovarianzmatrix ausgegeben werden. Aus dieser wird dann mit dem Programm `ext_qxxniv` die Information auf den GPS/Nivellement-Punkten extrahiert.

Falls die drei Datensätze unabhängig voneinander sind, keine systematischen Fehler enthalten und sich auf dasselbe Referenzsystem beziehen, lassen sich die GPS/Nivellement-Residuen folgendermassen verteilen:

$$\begin{aligned} v_{GPS} &= Q_{GPS} \cdot (Q_{GPS} + Q_{niv} + Q_{geoid})^{-1} \cdot res_{tot} \\ v_{niv} &= -Q_{niv} \cdot (Q_{GPS} + Q_{niv} + Q_{geoid})^{-1} \cdot res_{tot} \\ v_{geoid} &= -Q_{geoid} \cdot (Q_{GPS} + Q_{niv} + Q_{geoid})^{-1} \cdot res_{tot} \end{aligned}$$

Eine Herleitung dieser Formeln ist in [Schlatter, 2007, Kapitel 10] aufgeführt.

Diese gewichtete Verteilung ist im Programm `vber` realisiert. Dazu werden als Input ein File mit den GPS/Nivellement-Residuen sowie die 3 Qxx-Matrizen benötigt. Als Output wird eine Tabelle mit den Verbesserungsanteilen der 3 Beobachtungstypen generiert. Diese müssen von den Daten subtrahiert werden, um ausgeglichene „Beobachtungen“ zu erhalten. Für die grafische Darstellung dieser Resultate dient das Programm `vertobl`.

Nun ist es aber so, dass für die offizielle Geoidlösung CHGeo2004 GPS/Nivellement-Messungen verwendet wurden. Deshalb sind die Datensätze nicht unabhängig voneinander. Es gibt aber keinen geeigneten Ansatz zum Modellieren dieser Kreuzkorrelationen. Deshalb wurde die Methode zunächst auf eine Geoidlösung ohne Verwendung der GPS/Nivellement-Messungen (nur Schweren und Lotabweichungen) angewendet. Die zu verteilenden Residuen von bis zu mehr als 20 cm dieser Geoidlösung sind in Abbildung 8-1 dargestellt.

Wenn wir nun die Residuen gewichtet verteilen, so erhalten wir die Resultate in Abbildung 8-2. Dort erkennt man, dass der grösste Teil der Residuen als Korrektur des Geoidmodells interpretiert wird. Das Nivellement erhält nur kleine, systematische Korrekturen von bis zu maximal 1 cm. Die restlichen, meist kleinen und unregelmässigen Korrekturen werden GPS zugeschlagen. Nur in Ausnahmefällen erhält GPS grössere Korrekturen und zwar nur auf Punkten, von welchen wir wissen, dass die GPS-Lösung nicht optimal ist. Zu bemerken ist hier allerdings noch, dass die Kovarianzen der GPS-Messungen noch um einen empirischen Faktor von 30 abgeschwächt werden mussten, damit überhaupt ein kleiner Teil der Residuen GPS zugeschlagen wurde.

Da bei dieser Verteilung der Residuen der allergrösste Teil in die Korrektur des Geoidmodells geht, macht es nicht viel Sinn, diese Methode so zu verwenden. Man kann genausogut ein auf die GPS/Nivellement-Punkte gezwängte Lösung rechnen und erhält praktisch dieselben Resultate ohne diese doch recht komplizierte Verteilung. Die kleinen Korrekturen, welche eigentlich noch an GPS und Nivellement korrigiert werden müssten, werden vernachlässigt. Deshalb ist die publizierte Schlusslösung von CHGeo2004 eine auf die gut bestimmten GPS/Nivellement-Punkte gezwängte Lösung.

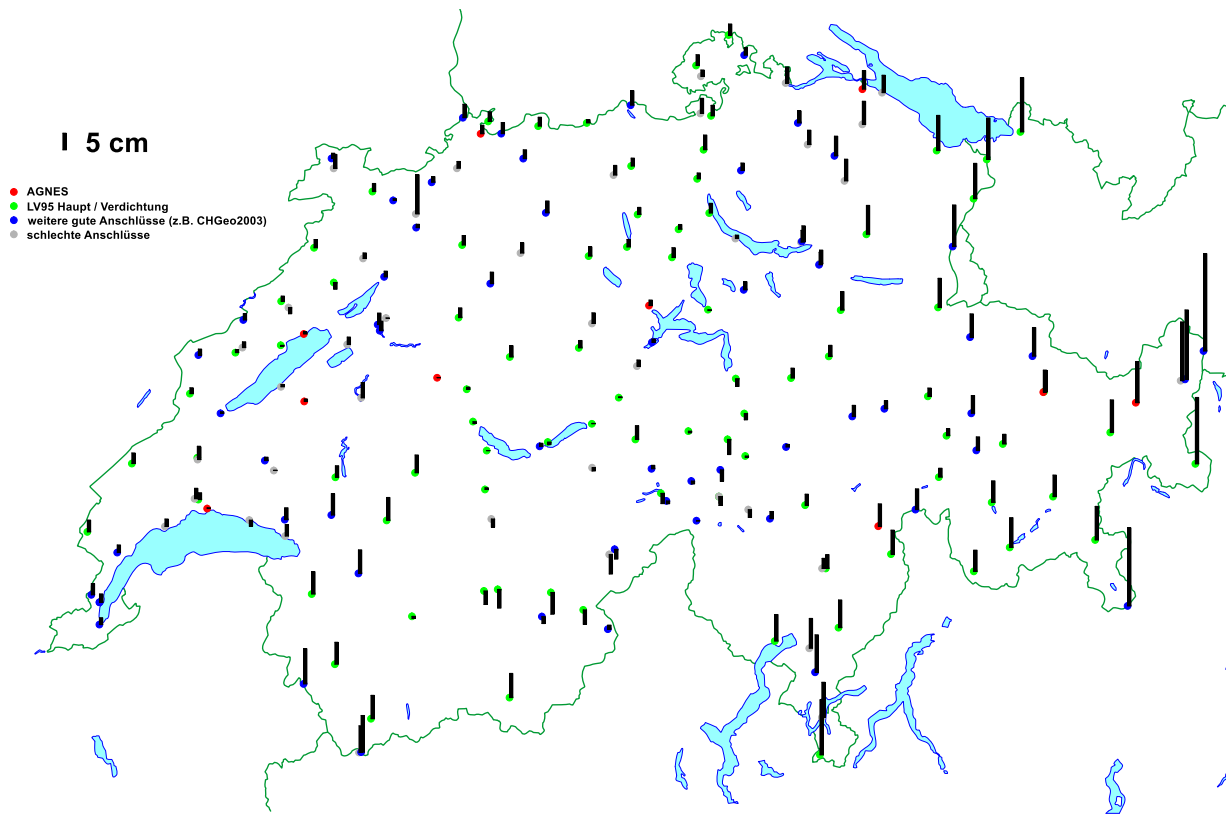


Abbildung 8-1: GPS/Nivellement-Residuen einer Geoidlösung nur aus Lotabweichungen und Schweren

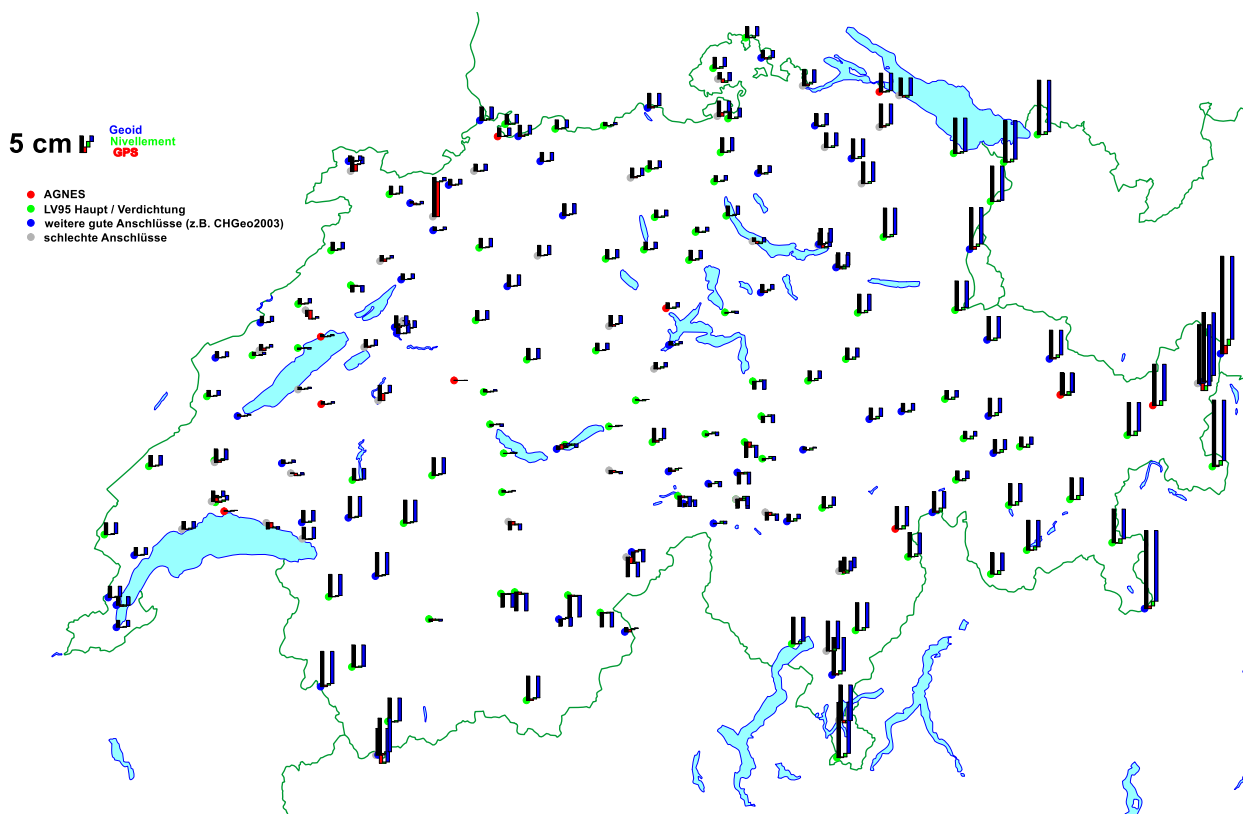


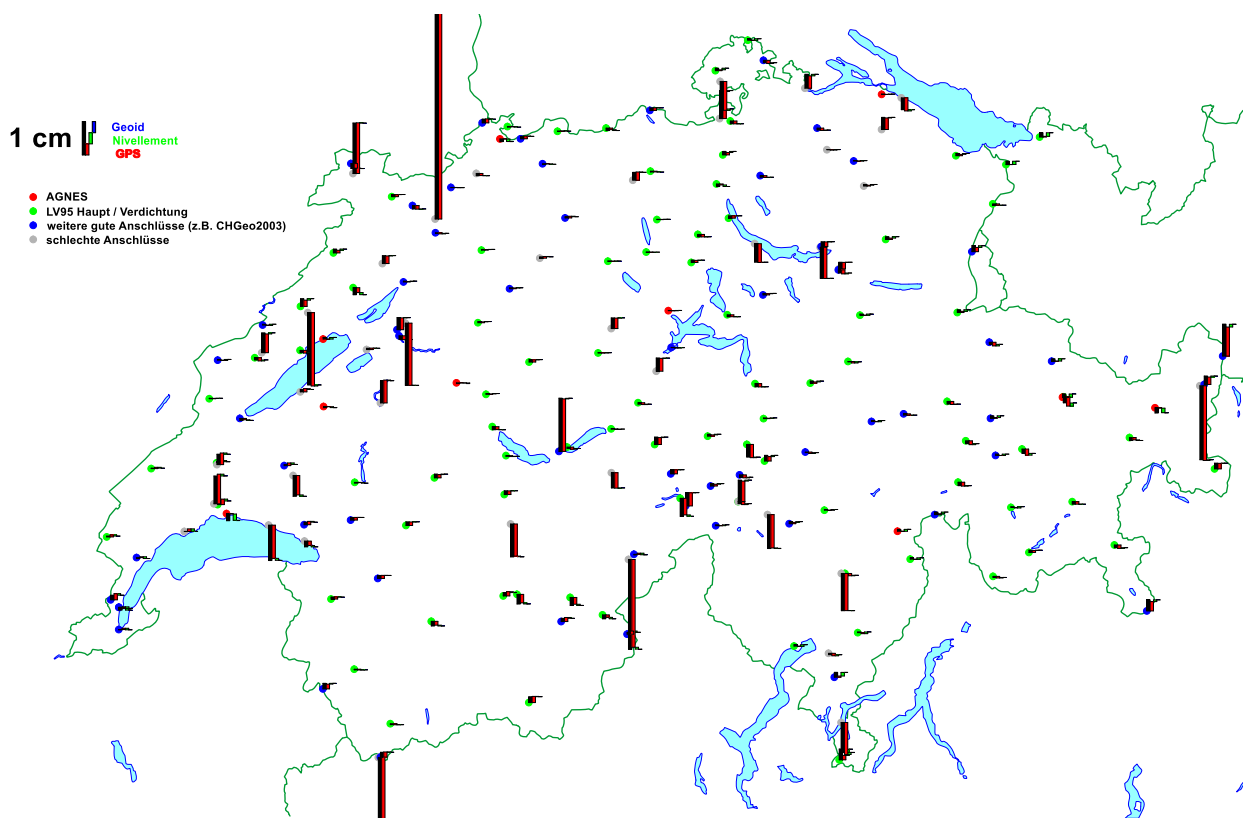
Abbildung 8-2: Gewichtete Verteilung der GPS/Nivellement-Residuen einer astro-gravimetrischen Lösung

Aber auch bei einer auf die guten GPS/Nivellement-Punkte praktisch gezwängten Lösung entstehen vor allem auf den schlechteren GPS/Nivellement-Punkten noch kleine Residuen, die verteilt werden sollten. Deshalb haben wir dieselbe Berechnung für die Verteilung auch für die Schlusslösung von CHGeo2004 gemacht. Dies ist zwar wegen der Nicht-Berücksichtigung der Kreuzkorrelationen nicht ganz korrekt, gibt aber trotzdem befriedigende Resultate, welche in Abbildung 8-3 dargestellt sind.

Zunächst sieht man, dass die verbleibenden Residuen sehr klein sind. Man beachte den gegenüber Abbildung 8-2 angepassten Massstab der Balken. Auf den guten GPS/Nivellement-Punkten sind die Residuen praktisch alle im Sub-Millimeter-Bereich. Der grösste Wert ist noch auf dem LV95-Punkt Grimsel mit ca. 5 mm zu finden. Es ist aber erfreulich zu sehen, dass auch auf den schlecht bestimmten Punkten (L1-Messungen in kurzen Sessionen) die Residuen meist unterhalb von 2 cm liegen.

Die Verteilung der verbleibenden Residuen ist nun völlig anders als in Abbildung 8-2. Fast die gesamten Residuen gehen in die ellipsoidischen Höhen aus GPS. Das Nivellement erhält nur minimale systematische Korrekturen im Sub-mm-Bereich und das Geoidmodell in der Regel gar nichts. Nur bei den AGNES-Stationen werden die eventuell verbleibenden, extrem kleinen Residuen wegen dem hohen Gewicht der GPS-Messungen dem Nivellement zugerechnet.

Aber auch in dieser Lösung lohnt sich ein Verteilen der Residuen auf die einzelnen Datensätze nicht. Wir rechnen sie gesamthaft der ellipsoidischen Höhe zu. Das Nivellement und das Geoidmodell erhalten keine Korrekturen.



**Abbildung 8-3:** Verteilung der Residuen der kombinierten Geoidlösung mit gezwängten und ungezwängten (schlecht bestimmten) GPS/Nivellement-Punkten

Die Berechnung eines auf GPS/Nivellement fixierten Geoidmodells und die Zuordnung der verbleibenden Residuen legt somit auch das Höhensystem LHN95 fest, welches zu CHGeo2004 kompatibel ist. Es ist in erster Linie durch die Nivellement-Messungen (Stand Ende 2004, korrigiert um die Schweremessungen) bestimmt. Für ans Nivellement angeschlossene GPS-Punkte hat also die Höhe aus Nivellement und Schwere Vorrang. Für alle anderen Punkte ergibt die Differenz aus ellipsoidischer Höhe und CHGeo2004 normalerweise orthometrische Höhen LHN95 mit einer Genauigkeit im 1cm-Bereich.

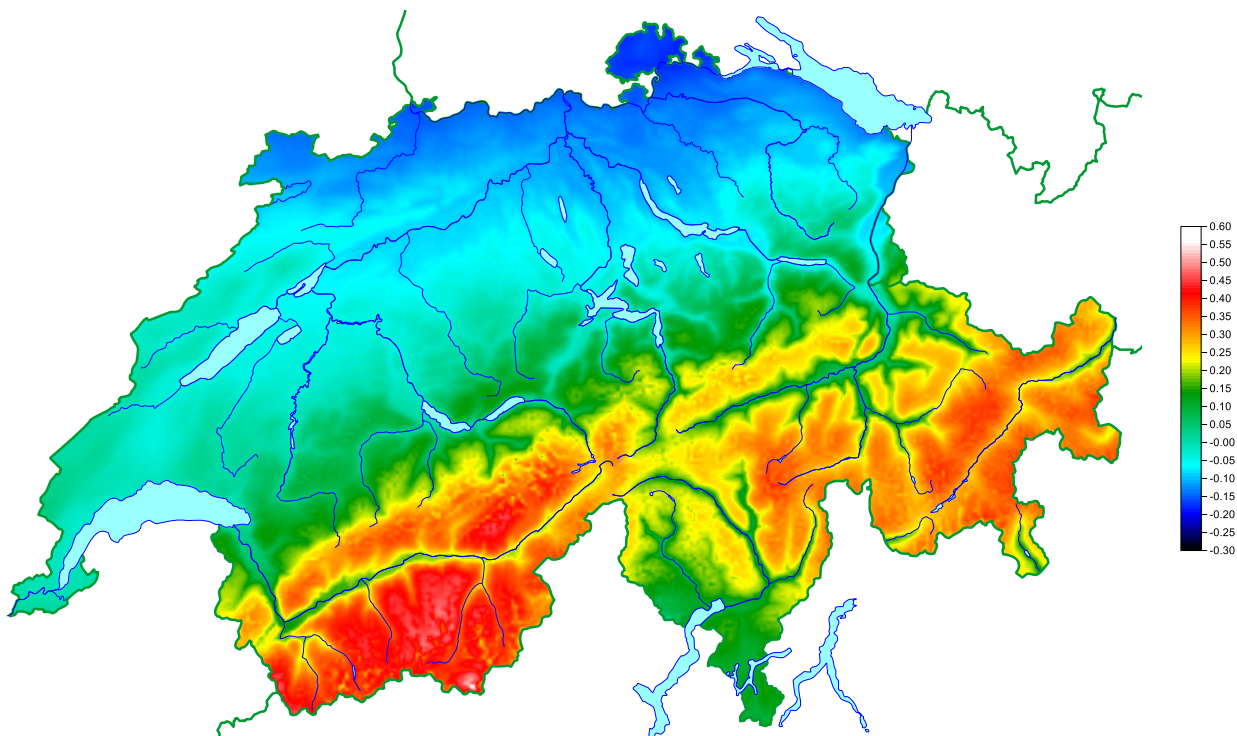
Damit ist die Konsistenz zwischen GPS, Nivellement und Geoid auf den GPS/Nivellement-Punkten im 1cm-Bereich erreicht und damit auch das Hauptziel von CH-CGN.

## 9 Die Höhentransformationsfläche HTRANS

### 9.1 Kurzbeschreibung

CHGeo2004 dient zur Umrechnung von ellipsoidischen Höhen aus GPS in orthometrische Höhen LHN95, oder falls das Quasigeoid verwendet wird, erhalten wir die Differenzen zwischen ellipsoidischen Höhen und Normalhöhen. In der Schweiz wird aber bis auf weiteres LN02 (Landesnivellement 1902) als offizielles Höhensystem der amtlichen Vermessung verwendet. Diese nicht um die Schwere korrigierten Gebrauchshöhen können um mehrere Dezimeter von den orthometrischen Höhen abweichen (Abbildung 9-1). Der GPS-Benutzer muss also in der Regel LN02-Höhen berechnen, was mit CHGeo2004 nicht direkt möglich ist. Deshalb wurde eine Höhentransformationsmethode entwickelt, welche als HTRANS benannt wurde. Die Grundlagen dieser Methode und umfangreiche Testberechnungen wurden schon mehrmals beschrieben, z.B. in [Marti 2002b], [Marti 2003] oder dann auch ausführlich in [Schlatter 2007, Kapitel 12]. Deshalb wird hier nur eine kurze Zusammenfassung der wesentlichsten Punkte gegeben.

Die Differenzen zwischen LHN95 und LN02 setzen sich aus mehreren Anteilen zusammen, die nicht einfach zu separieren sind. Dies sind: Verzerrungen in LN02, Vertikalbewegungen und der Einfluss des Schwerefeldes. Da sich diese Einflüsse nicht auf einfache Weise separieren lassen, wurde für die Modellierung ein pragmatischer Ansatz gewählt, bei welchem die Unterschiede in 3 Teile aufgeteilt werden. Der erste Teil entspricht den Differenzen zwischen LN02 und Normalhöhen. Diese Unterschiede betragen zwischen -20 cm ganz im Norden bei Schaffhausen und etwa +10 cm im Tessin und sind relativ einfach interpolierbar. Diese Anteile werden in einem 1x1-km abgespeichert und bilden einen lageabhängigen Anteil. Der wesentlichste Teil der Unterschiede zwischen Normalhöhen und orthometrischen Höhen werden durch die Schwereanomalien verursacht und wirken wie ein lokaler Höhenmassstab. Eine sehr gute Näherung dafür sind die Bouguer-Anomalien, welche ebenfalls in einem 1x1km-Gitter abgespeichert werden und einen höhenabhängigen Anteil bilden. Der danach noch verbleibende dritte Anteil ist vor allem verursacht durch Masseninhomogenitäten in der Erdkruste und im Erdmantel. Eigentlich wäre auch dieser in erster Linie höhenabhängig, wurde aber als rein lageabhängige Korrekturfläche modelliert. Näheres zur Methode und Genauigkeitsuntersuchungen sind in [Schlatter 2007] zu finden. Als Genauigkeitsangabe für HTRANS kann zusammengefasst werden, dass in der Nähe der Linien des Landesnivellements eine Genauigkeit von besser als 1 cm erreicht werden kann, im Mittelland abseits der Linien Nivellementslinien sind sie im 1 bis 2 cm-Bereich und in den Alpen können zwischen den offiziellen LN02-Höhen und den aus HTRANS transformieren durchaus Differenzen von mehr als 10 cm auftreten.



**Abbildung 9-1:** Unterschiede orthometrische Höhen LHN95 minus LN02 (in Metern)

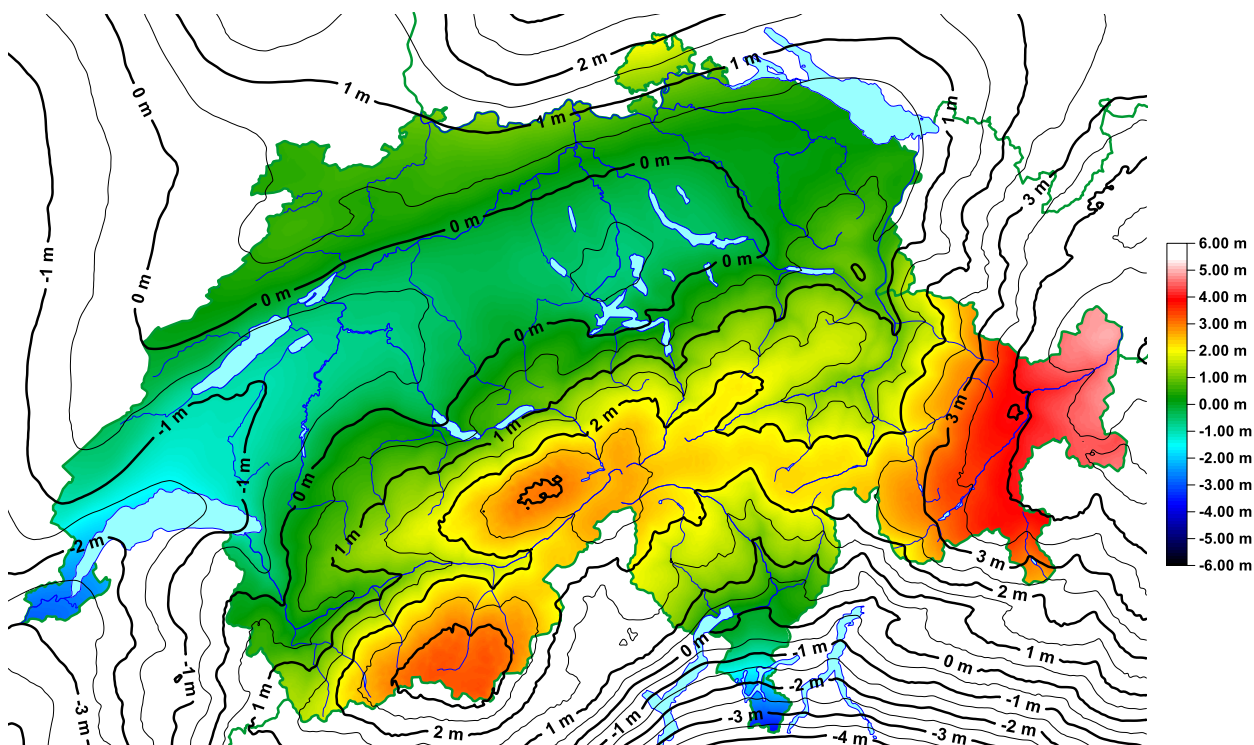


## 9.2 CHGeo2004/HTRANS

Die Transformation zwischen LHN95 und LN02 stützt sich also auf 3 Gitter mit einer Auflösung von jeweils 1x1 km. Dies ist allerdings in den meisten GPS-Empfängern oder in GIS-Programmen nicht ein Verfahren, welches standardmässig unterstützt wird. Deshalb kam bald der Wunsch auf, diese Berechnung mit nur einer einzigen Transformationsfläche zu approximieren. Dies lässt sich natürlich einfach realisieren, indem die 3 Gitter addiert werden. Beim Höhenmassstab muss dabei noch die Bouguer-Anomalie mit einer aus einem digitalen Geländemodell interpolierten Höhe multipliziert werden. Deshalb kann dieses Gitter auch nicht im Erdinneren (z.B. in Tunnels) verwendet werden. Auf der Erdoberfläche, also dort wo die Transformation von GPS-Messungen üblicherweise angewendet wird, funktioniert die Berechnung aus einem einzigen Gitter einigermaßen befriedigend, allerdings wegen der Höhenabhängigkeit und der bisher verwendeten Auflösung von 1x1 km doch deutlich schlechter als mit 3 Teilgittern. Auch dazu sind in [Schlatter 2007] ausführliche Untersuchungen publiziert worden.

Für die meisten kommerziellen Anwendungen ist aber auch eine solche Transformation von einem Höhensystem in ein anderes nicht möglich. Üblicherweise hat eine Höhentransformation immer über den Umweg von ellipsoidischen Höhen zu erfolgen. Deshalb war es nötig, nicht nur eine Transformationsfläche zwischen LHN95 und LN02, sondern auch eine zwischen LN02 und ellipsoidischen Höhen zu berechnen, also eine geoidähnliche Transformationsfläche, welche die beiden Anteile von Geoid und HTRANS enthält. Diese in Abbildung 9-2 dargestellte Fläche zeigt im Wesentlichen die Charakteristiken von CHGeo2004, ist aber noch leicht um den HTRANS-Anteil modifiziert. Die Genauigkeit entspricht natürlich etwa derjenigen von HTRANS und ist in der Nähe der Linien des Landesnivellements und im Flachland genauer als in den Alpen.

Dieses Modell, welches wir CHGeo2004/HTRANS nennen, wurde in einem Gitter von 1x1 km Auflösung berechnet und wird so an die Kunden abgegeben. Je nach Verarbeitungsweg wird dieses Modell entweder im Schweizerischen Projektionssystem oder in ETRS89 (Auflösung 30x30“) benötigt.



**Abbildung 9-2:** Transformationsfläche CHGeo2004/HTRANS im Referenzsystem CH1903+

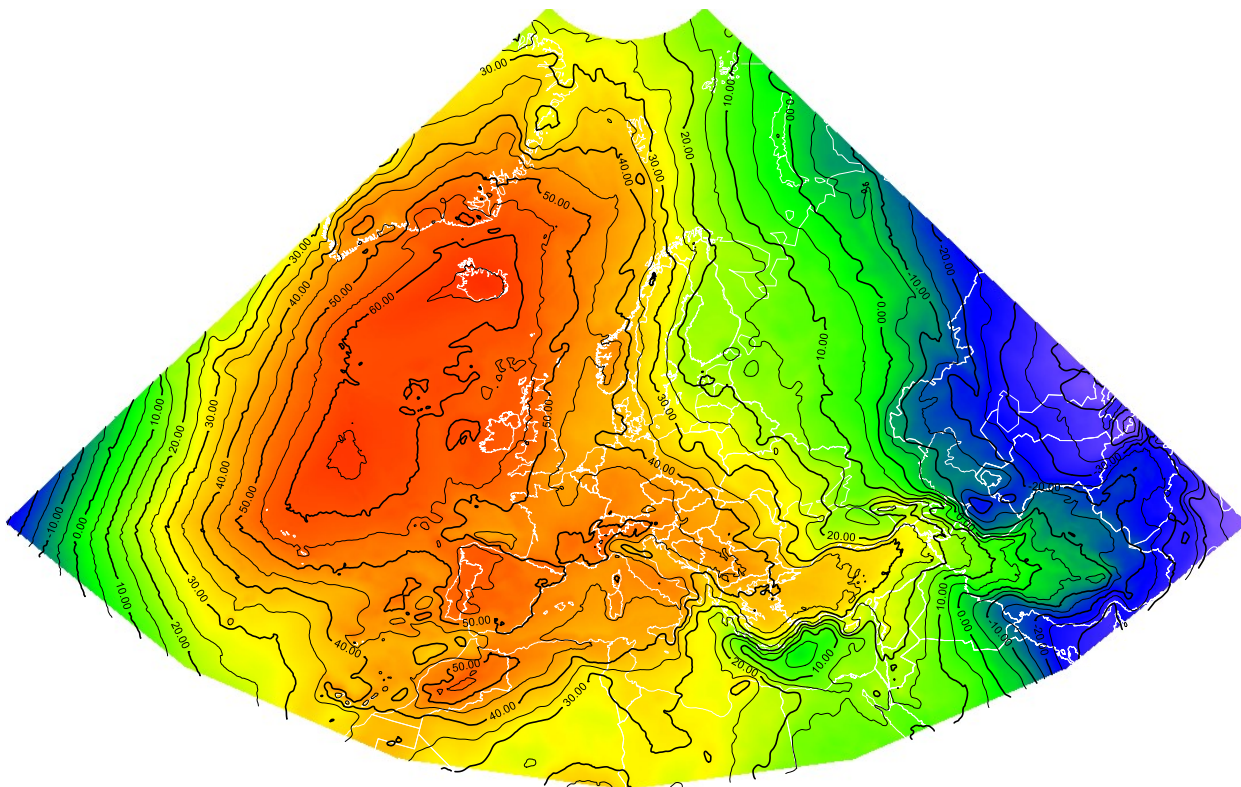
## 10 Vergleich von CHGeo2004 mit anderen Modellen

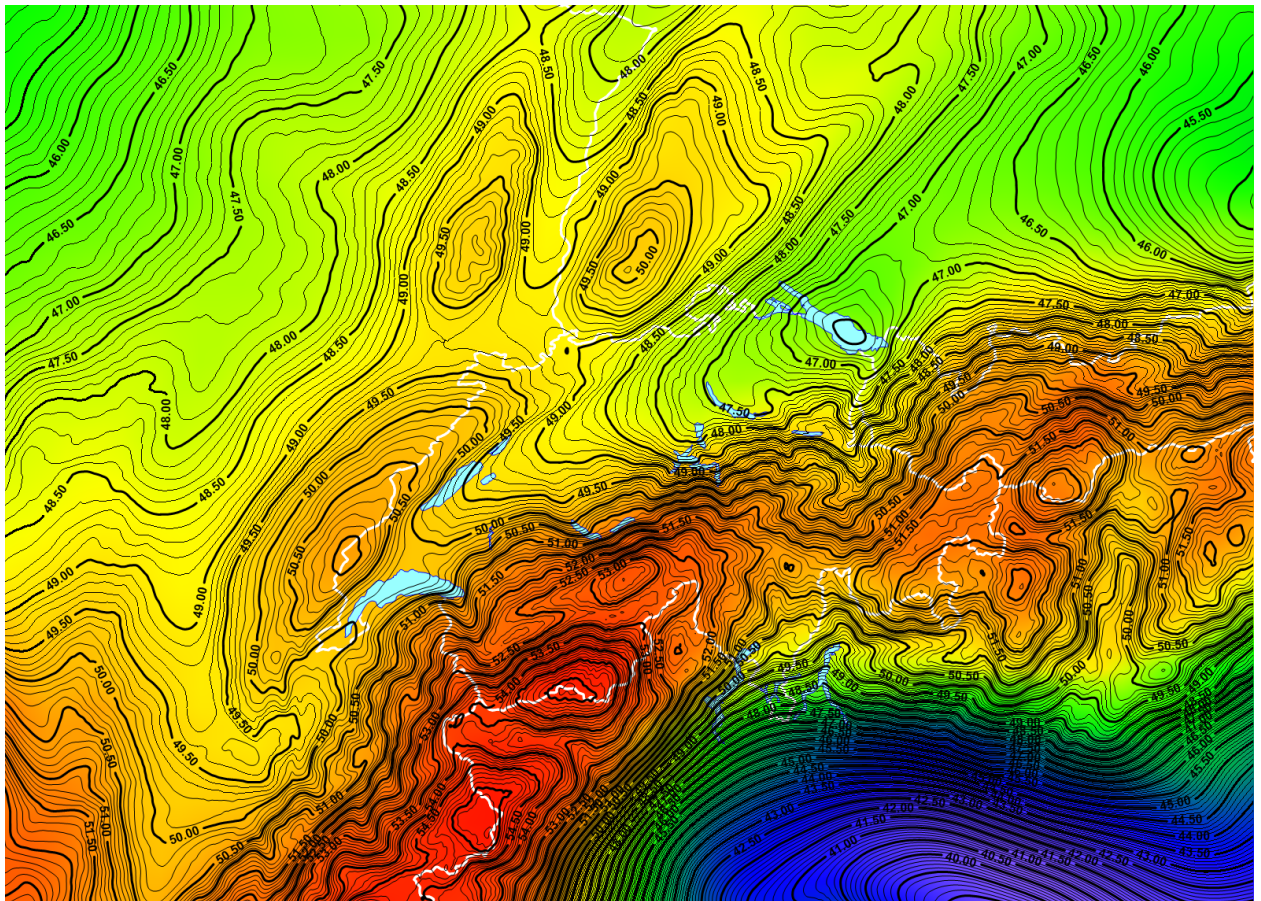
Als externe Validierung des Geoidmodells CHGeo2004 können andere, unabhängig berechnete Modelle verwendet werden. Dies sind in erster Linie die globalen Modelle, die europäischen Modelle und in Teilgebieten auch die Geoidmodelle der Nachbarländer, welche allerdings hier nicht vorgestellt werden.

### 10.1 Vergleich mit dem europäischen Geoidmodell

Im Verlauf der letzten Jahre wurden verschiedene europäische Geoidmodelle berechnet. Diese sind unter dem Namen „European Gravimetric Geoid“ (EGG) plus einer Jahreszahl bekannt. Diese Modelle wurden allesamt am Institut für Ermessung (IfE) der Universität Hannover (von H. Denker) berechnet. Es sind rein gravimetrische Lösungen unter Einbezug von Satellitendaten (v.a. GRACE), seit diese verfügbar sind. GPS/Nivellement wurde offiziell nur zur Verifizierung verwendet, ausser in einigen Testversionen. Als Methode der Geoidbestimmung wurde FFT (Fast Fourier Transformation) angewendet.

Aus der Schweiz wurde in den frühen Lösungen der gravimetrische Datensatz verwendet, welcher damals beim BGI (Bureau Gravimétrique International) vorhanden war. Das waren insbesondere die für die Schwerekarte 1980 verwendeten Daten (plus einige ältere lokale Projekte). Ab 2004 stand dem IfE der Datensatz für den gravimetrischen Atlas 1:100'000 zur Verfügung. Ab diesem Zeitpunkt wurde auch das DHM25 als Geländemodell verwendet. In der Regel handelt es sich bei den EGG-Modellen um ein Quasigeoid. Geoidmodelle wurden daraus teilweise mit einer einfachen Methode aus Schwere-Anomalien berechnet. Verglichen wurde das CHGeo2004 mit den Modellen EGG1996, EGG1997, EGG2007, EGG2008 und EGG2015 (Abbildung 10-1), wobei hier nicht alle Resultate aufgezeigt werden. Publiziert wurden die EGG-Modelle mit einer Auflösung von 1x1.5 Bogenminuten in den älteren und mit 1x1 Bogenminuten in den neueren Modellen. In den neueren Modellen wurde EVRF2007 als Höhenrahmen verwendet.

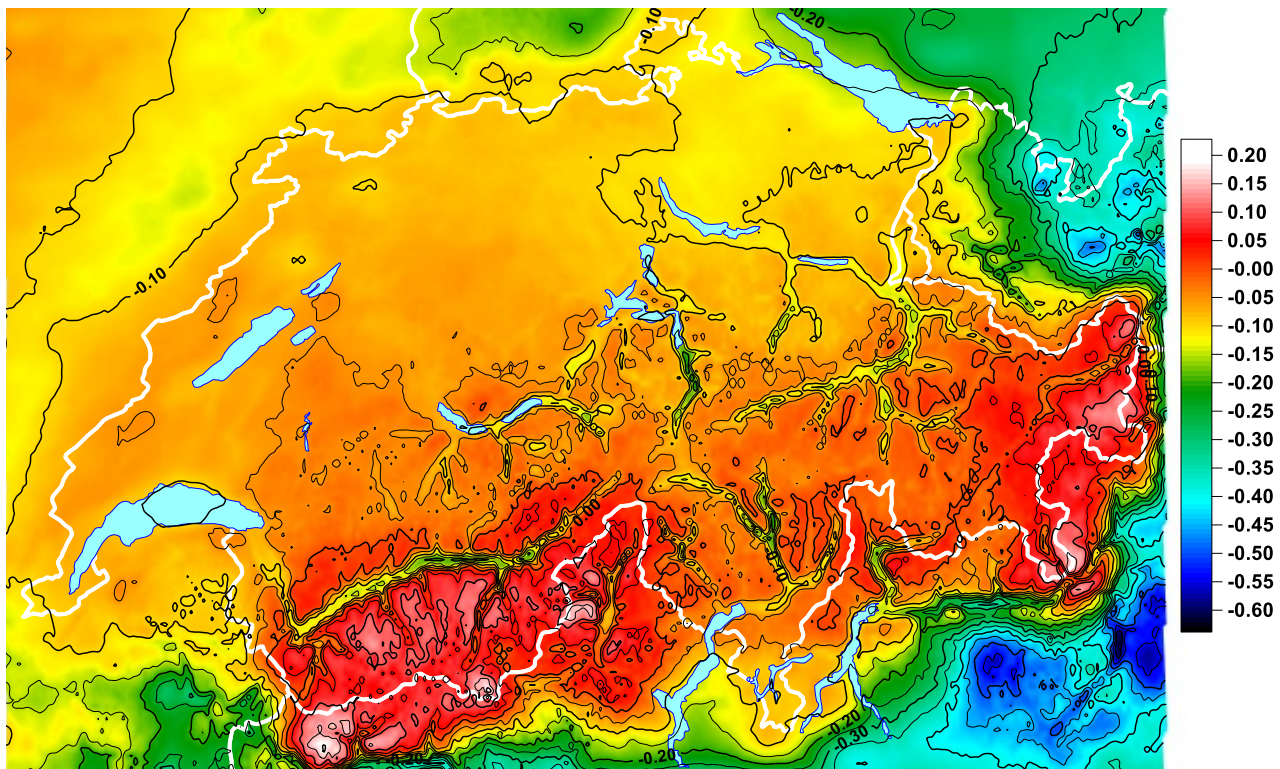




**Abbildung 10-2:** Quasigeoid EGG2015 im Alpenraum

Die Differenzen zwischen EGG2008 und CHGeo2004 sind in Abbildung 10-3 dargestellt. Im Mittelland zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Modelle im Bereich von einigen wenigen cm. Ein genereller Offset von ca. -10 cm stimmt gut mit dem Unterschied in den Höhensystemen überein. In den Alpen wachsen die Differenzen im Wallis und in Graubünden auf über +5 cm an. Die Tendenz dieser Differenzen entspricht auch dem Trend, welchen wir in der rein gravimetrischen Lösung von CHGeo2004 gesehen haben (vgl. Abbildung 5-4).

Sehr auffallend ist auch, wie stark sich die Alpentäler im Differenzenplot abzeichnen. Hier gibt es noch grundsätzliche Unterschiede, welche durch die verschiedenen Berechnungsansätze (Kollokation oder FFT), die Reduktionsmethoden und auch durch die räumlichen Auflösung (das EGG-Quasigeoid ist stärker geglättet) verursacht werden. Auch im benachbarten Ausland ergeben sich grössere Unterschiede, obwohl wir dort CHGeo2004 auf die Lösung EGG97 fixiert haben. Grössere Unregelmässigkeiten in Italien und Österreich fallen in Gegenden, wo die gravimetrischen Daten (zumindest diejenigen, welche für CHGeo2004 benutzt wurden) nicht von sehr guter Qualität sind.



**Abbildung 10-3:** Differenzen CHGeo2004 (Quasigeoid) minus EGG2008 (Isolinienabstand 5 cm)

## 10.2 Vergleich mit dem globalen Geoidmodell EGM2008

Das globale Kugelfunktionsmodell EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) [Pavlis et al. 2012] ist der Nachfolger des in CHGeo2004 verwendeten Referenzmodells EGM96. Es wurde aus Satellitendaten (v.a. GRACE, aber nicht nur), Satellitenaltimetrie und terrestrischen Gravimetriedaten berechnet. Es ist in erster Linie als Kugelfunktionsmodell mit Grad und Ordnung von 2190 erhältlich. Das entspricht in etwa einer räumlichen Auflösung von 5 km, was für ein globales Modell extrem hoch ist. EGM2008 ist sowohl als Geoid als auch als Quasigeoid erhältlich.

Aus der Schweiz wurden die gravimetrischen Punkte für den Atlas 1:100'000 in Form von Freiluftanomalien verwendet. Die GPS/Nivellement-Punkte dienten nur zur Überprüfung.

In Abbildung 10-4 ist derselbe Ausschnitt des EGM2008 dargestellt wie in Abbildung 10-2 für das EGG2015. Die räumliche Auflösung ist zwar leicht geringer, aber sehr viele Details sind doch ähnlich. Dies ist das erste Mal, dass in einem globalen Modell auch der Einfluss der grössten Alpentäler sichtbar ist.

Die Differenzen zwischen den Quasigeoiden EGM2008 und EGG2015 sind in Abbildung 10-5 dargestellt. Neben einem generellen Offset von ca. -30 cm wegen der Wahl des Höhensystems, sieht man die sehr gute Übereinstimmung im Flachland (Frankreich, Deutschland, Poebene). Im Alpenraum werden die Unterschiede aber sehr unregelmässig und erreichen Beträge zwischen -84 und +8 cm. Ein Grossteil dieses Anteils ist auf die kleinere räumliche Auflösung des EGM2008 zurückzuführen. Im Alpenraum gibt es noch beträchtliche Anteile am Geoid, welche über dem Frequenzbereich von EGM2008 liegen. Dies wurde auch im regionalen Geoidmodell EurAlpGM2011 (European Alpine Gravity Model 2011) [Hirt et al. 2010] gezeigt, wo als Erweiterung zum EGM2008 noch der Anteil der residuellen Topografie hinzugefügt wurde. Das ergibt im Alpenraum doch noch Anteile im Bereich von  $\pm 20$  cm (siehe Abbildung 10-6). Dies ist aber nicht der einzige Grund für die Unterschiede. Auch die Methodik und die verwendeten Daten spielen eine Rolle.

In Abbildung 10-7 ist schliesslich noch die Differenz zwischen EGM2008 und CHGeo2004 dargestellt. Auch hier sind wiederum die relativ gute Übereinstimmung in den flacheren Regionen und die Problematik im Gebirge sichtbar. Die mittlere Abweichung des EGM2008 auf den schweizerischen GPS/Nivellement-Punkten liegt bei 6.7 cm nach Abzug eines Höhenoffsets, was für ein globales Modell sicher ein sehr gutes Resultat ist.

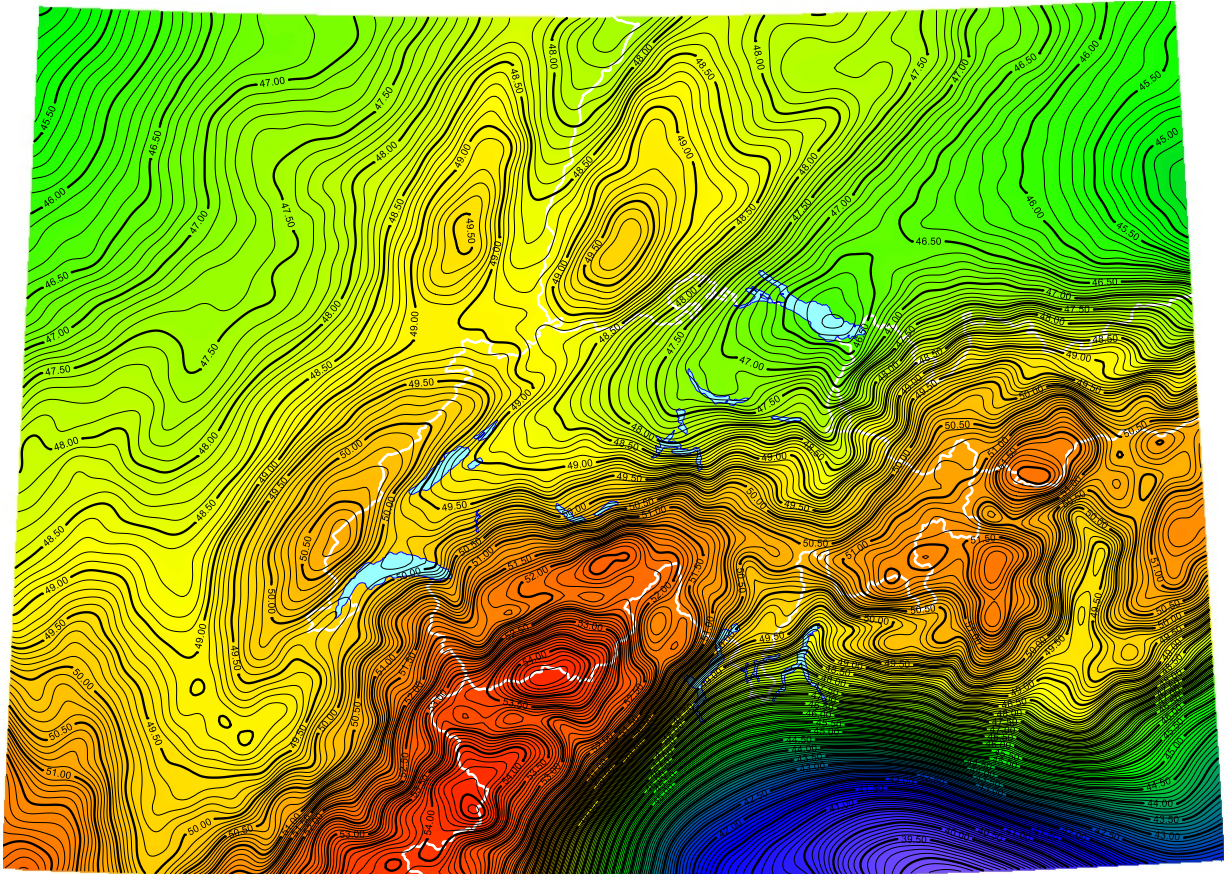


Abbildung 10-4: Geoidmodell EGM2008 im Alpenraum

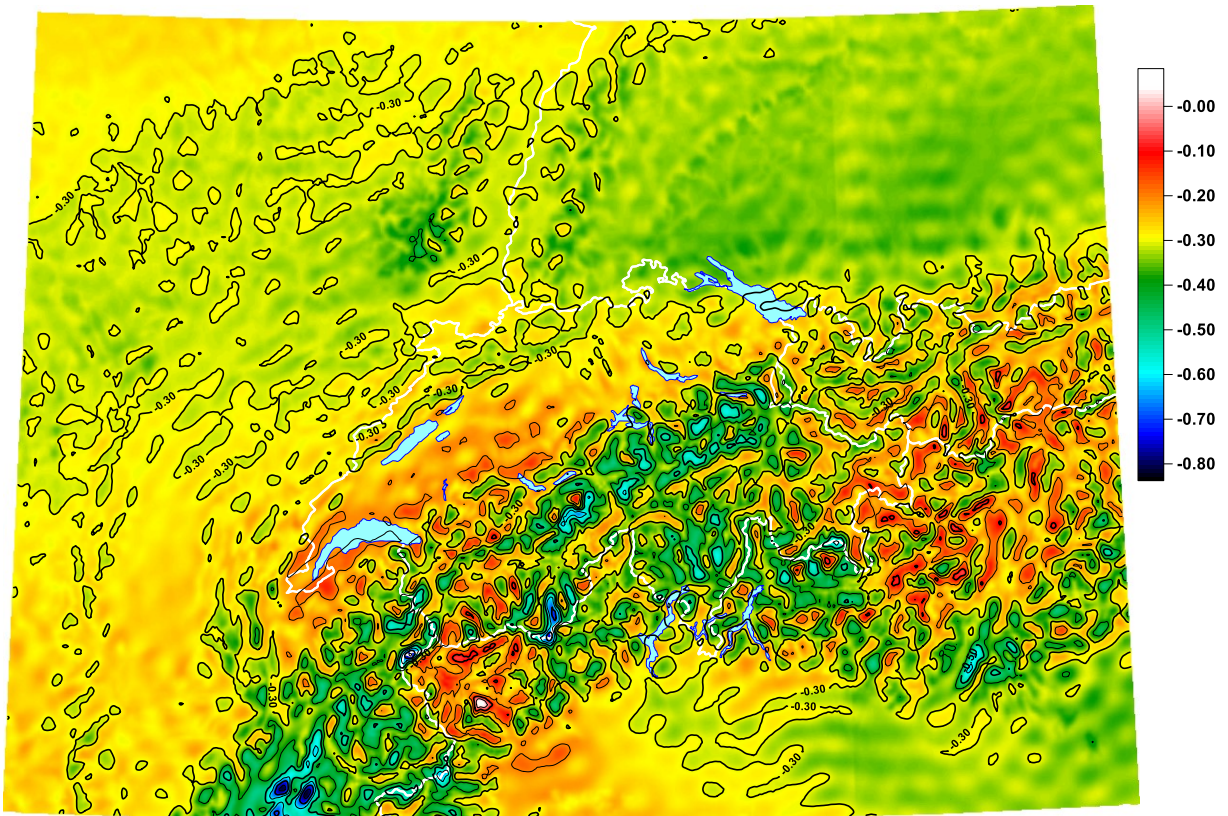
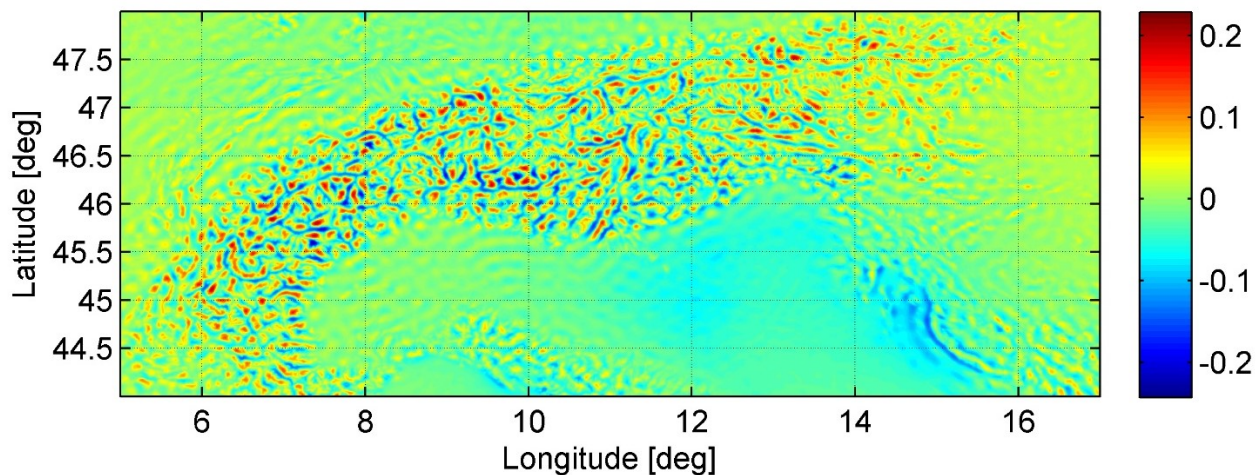
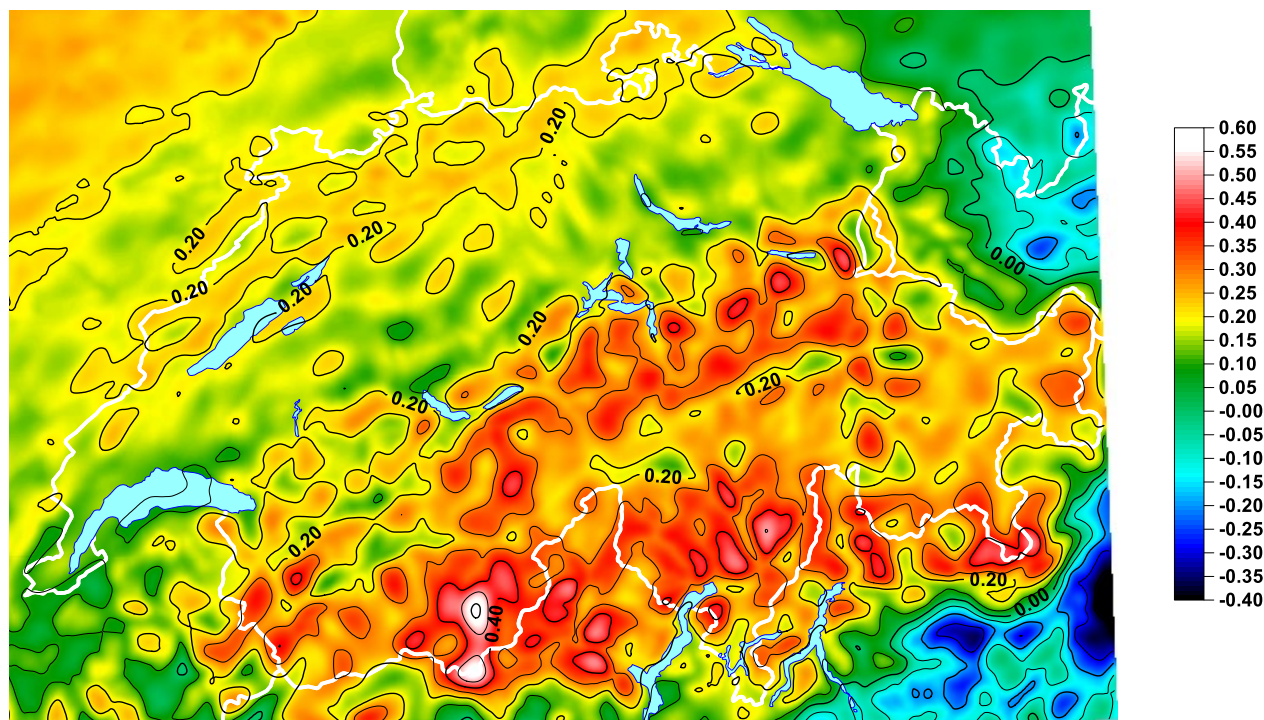


Abbildung 10-5: Differenzen EGM2008 minus EGG2015 (Isolinienabstand 10 cm)



**Abbildung 10-6:** Anteil der Wirkung der Topografie auf das Quasigeoid im Alpenraum im Frequenzbereich ausserhalb der Auflösung des EGM2008 (Bild von C. Hirt)  
<https://geodesy.curtin.edu.au/research/resolution/eur-alp.cfm>



**Abbildung 10-7:** Differenzen CHGeo2004 minus EGM2008

## 11 Berechnungs-Software

Bei der Berechnungssoftware für das Geoid unterscheiden wir zwischen zwei Kategorien. Dies ist einerseits die Software, welche für die Berechnung des Geoidmodells benötigt wird und andererseits die Software, welche an die Endbenutzer für die Berechnung von Geoidhöhen und Lotabweichungen abgegeben wird.

### 11.1 Programme für die Berechnung des Geoidmodells

Für die Berechnung eines neuen Geoidmodells wird eine beträchtliche Anzahl von Einzelprogrammen verwendet, welche die nötigen Schritte einzeln ausführen. Diese Programme sind für den internen Gebrauch vorgesehen und sind deshalb auch nicht sehr benutzerfreundlich gehalten.

Das Programm QUAWIRK dient in erster Linie zur Berechnung des Einflusses von Massenmodellen auf die Schwerefeldgrössen (Lotabweichung, Schwere und Höhenanomalie). Dabei kann ein einzelnes Modell oder auch eine Kombination von Modellen gewählt werden. Eine Vielzahl von Parametern steuert den exakten Berechnungsvorgang durch die Wahl von Grenzabständen für die Approximation der Massen durch Quader, Masselinien oder Massenpunkte. QUAWIRK wird auch für die Schwereinterpolation und Berechnung von mittleren Schweren entlang der Lotlinie benötigt. Das Programm wird im Remove-Schritt der Reduktion der Rohdaten verwendet, dann aber auch wieder im Restore-Schritt bei der Berechnung auf einem regelmässigen Raster.

Das zweite zentrale Programm für die Geoidberechnung ist HITCOL (Harmonic Interpolation by Collocation; ursprüngliche Version von B. Wirth, [Wirth, 1990]). Damit wird aus dem Residualfeld der Beobachtungen der Korrelationsvektor der Kollokation berechnet. Als wählbare Grössen treten in erster Linie das Kovarianzmodell und dessen Parameter auf. Zudem kann der Referenzpunkt und die Gitterauflösung für die Berechnung der relativen mittleren Fehler gewählt werden. Für eine Auswahl von Punkten (in der Regel die GPS/Nivellement-Punkte) kann auch die Ausgabe der vollständigen Qxx-Matrix verlangt werden. Die Parameter des Kovarianzmodells werden empirisch aus den reduzierten Beobachtungen mit dem Programm DOSIG0 erhalten.

Neben den beiden hauptsächlichen Programmen QUAWIRK und HITCOL werden noch weitere Programme für Teilaufgaben benötigt. Die wichtigsten davon sind GEOPPT zur Berechnung des Einflusses eines Kugelfunktionsmodells, LOTABW zur Berechnung von Lotabweichungen aus astronomischen und geodätischen Koordinaten, TOPOMOD zur Aufbereitung der digitalen Höhenmodelle und POTENZ für die Berechnung des Einflusses von unregelmässigen Polyedern.

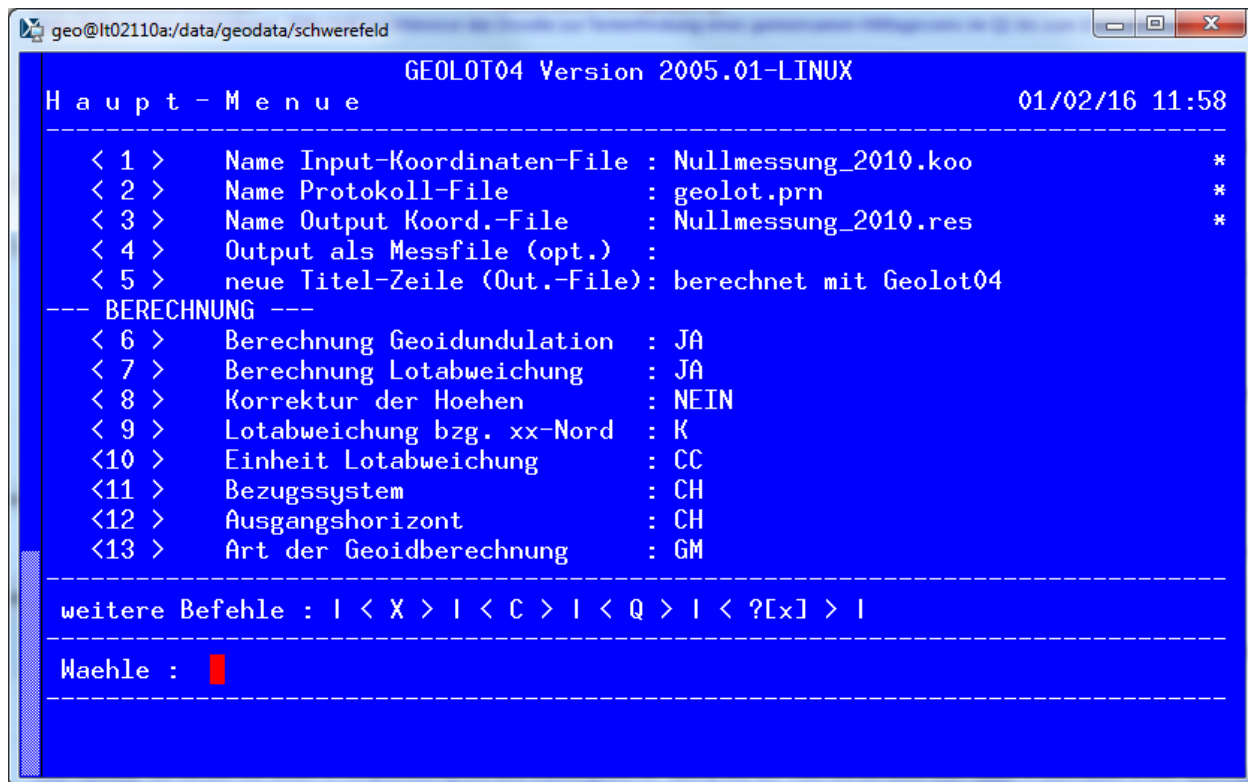
Nicht erwähnt werden hier die Programme für die Aufbereitung der Rohdaten, bis man überhaupt ‚beobachtete‘ GPS-Höhen, Nivellement-Höhen oder astronomische Koordinaten hat (z.B. KINETZ und Hilfsprogramme) oder Programme für die grafische Darstellung der Resultate und die Koordinatentransformationen.

### 11.2 Programme für die Endbenutzer

Das Geoidmodell wird für die meisten Benutzer in Form eines regelmässigen Gitters abgegeben. Dies ist je nach verwendeter Software ein Gitter mit einer Auflösung von 1x1 km im schweizerischen Projektionssystem (CH1903/LV03 und CH1903+/LV95) oder ein Gitter mit einer Auflösung von 0.5x0.5 Bogenminuten in ETRS89. Bei dieser Abgabe genügt eine einfache Interpolation der Gitterpunkte. Wir haben als Standardmethode die biquadratische Interpolation aus den 9 nächstgelegenen Gitterpunkten gewählt (siehe [Marti 1998]). Diese Gitterinterpolation wurde ursprünglich im swisstopo-Programm CHGeo-R realisiert. Später wurde dieses in das allgemeine Transformationsprogramm REFRAME [Ray und Marti, 2007] und in GeoSuite [Ray, 2012] integriert. Mit diesen Programmen lässt sich der Unterschied zwischen LHN95 und LN02 mit HTRANS ebenfalls durch biquadratische Interpolation berechnen. Die Gitterinterpolation ist auch in mehreren Produkten von externen Softwareherstellern enthalten.

Für die Berechnung von Lotabweichungen eignet sich die Gitterinterpolation nicht besonders gut. Deshalb wurde für den Eigenbedarf von swisstopo auch das Programm GEOL04 entwickelt. Eine Gitterinterpolation ist zwar auch mit diesem Programm möglich, der Hauptzweck besteht jedoch in der Berechnung von Geoidundulationen und Lotabweichungen direkt aus den bei der Modellbildung verwendeten Massenmodellen, des globalen Modells und des Korrelationsvektors. Dieses Programm wird in erster Linie auf den Linux-Servern von swisstopo verwendet, existiert aber auch als eine unter MSWindows lauffähige Version. Die für den Benutzer sichtbaren Optionen von GEOL04 sind bewusst minimal gehalten worden, um Bedienungsfehler möglichst zu vermeiden und entsprechen denjenigen des

Vorgängerprogramms GEOLOT98 (siehe [Marti 2008]). So gibt es nur einen einzigen Bildschirm mit Eingabeparametern (Abbildung 11-1).



**Abbildung 11-1:** Optionenbildschirm von GEOLOT04

In der Option <1> wird die Input-Datei gewählt. Erlaubt sind nur Dateien in den LTOP-Formaten PK (Landeskoordinaten LV03 oder LV95 und orthometrische Höhen) und PE (ellipsoidische Höhen).

Die Option <2> bezeichnet die Output-Datei mit den protokollierten Berechnungen.

Option <3> ist die Output-Datei mit den berechneten Grössen im Format LTOP-PK oder LTOP-PE.

Wahlweise kann mit der Option <4> auch ein Output als LTOP-Messfile generiert werden.

Option <5> ist ein Titel, welcher in allen Outputdateien erscheint.

Mit den Optionen <6> und <7> wird angegeben, ob überhaupt Lotabweichungen und/oder Geoidundulationen berechnet werden sollen.

Mit der Option <8> wird angegeben, ob die Höhen im Resultatfile um die Geoidundulation korrigiert werden sollen. Dies steuert, ob das Resultatfile im LTOP-PK oder LTOP-PE-Format sein wird.

Option <9> legt fest, ob die berechneten Lotabweichungen bezüglich Kartennord (K) oder geografisch Nord (G) ausgegeben werden. Für normale Vermessungsaufgaben im Schweizerischen Projektionssystem sollte dies immer auf Kartennord gesetzt bleiben.

Die Option <10> legt die ausgegebenen Einheiten der berechneten Lotabweichungen fest. Alle swisstopo-Programme verlangen die Lotabweichungen in Neusekunden (CC). Für Spezialanwendungen können aber auch Bogensekunden (") gewählt werden.

Als Bezugssystem der Geoidundulationen und der Lotabweichungen kann in Option <11> entweder CH (CH1903+ und CH1903 werden nicht unterschieden) oder ETRS89 gewählt werden.

Option <12> bezeichnet den Höhenhorizont. Normalerweise wird dieser auf CH belassen. Dann erhält man Geoidhöhen im Schweizer System LHN95. Bei der Wahl von ETRS89 erhält man Höhen im europäischen System EVRS. Dies entspricht einem Höhenoffset von 10.3 cm.

Option <13> bestimmt schliesslich die Art der Geoidberechnung. Mögliche Eingaben sind GR für eine Geoidberechnung aus dem 1km-Raster, QR für die Quasigeoidberechnung aus dem Raster, GM für die Geoidberechnung aus Massenmodellen und QM für die Quasigeoidberechnung aus Massen. Für die Lotabweichungen ist diese Option wirkungslos. Diese werden immer aus Massen berechnet.



Dies sind bereits alle für Standardanwendungen vorgesehenen Optionen. Für Spezialberechnungen ist es aber auch möglich, sehr viele weitere Parameter direkt im Optionenfile (Defaultname GEOL04.OPT) anzupassen. So kann man die Einflüsse einzelner Teilmodelle berechnen oder die Genauigkeit der Berechnungen steigern (auf Kosten der Rechengeschwindigkeit), indem man genauere Berechnungsparameter wählt. Man kann auch die Wirkung von selbstdefinierten Störkörpern berechnen oder andere Geländemodelle als die standardmässig verwendete Kombination aus DHM25 und SRTM (siehe Kapitel 3.1).

## 12 Arbeiten nach Abschluss von CHGeo2004

Nach der Publikation des Geoidmodells CHGeo2004 wurden weitere Schwerefeldgrössen gemessen, die einerseits zur Überprüfung von CHGeo2004 dienen können, aber auch bei einer zukünftigen Geoidbestimmung nützlich sind. Insbesondere handelt es sich dabei um neue GPS/Nivellement-Stationen, welche das Netz weiter verdichten, aber auch neue Lotabweichungen, welche für lokale Projekte oder auch gezielt für die Überprüfung des Geoidmodells gemessen wurden. Insbesondere zu erwähnen sind hier die Diplomarbeit von M. Ganz [Ganz, 2007] über eine lokale Geoidbestimmung am Sustenpass und die Masterarbeit von B. Lindegger [Lindegger, 2011] über die Verbesserung des Geoidmodells im Unterengadin. Es handelt sich dabei um zwei Gebiete, welche bei der Berechnung von CHGeo2004 als problematisch erkannt wurden. Zudem wurden 2009-2010 auf 8 Punkten des CERN Wiederholungsmessungen durchgeführt [Guillaume, 2015].

### 12.1 Erweiterung des Perimeters

2009 kam der Wunsch auf, dass der Perimeter von CHGeo2004 so erweitert wird, dass er das gesamte bei swisstopo in digitalen Landschaftsmodellen (TLM, topografisches Landschaftsmodell) verwendete Gebiet abdeckt. Deshalb wurde der Perimeter (LV03) von ursprünglich 480'000-840'000 in West-Ost-Richtung und 60'000-302'000 in Süd-Nord-Richtung auf den TLM-Perimeter von 460'000-868'000 und 42'000-322'000 erweitert.

Dabei ging es in erster Linie nicht um eine gute Genauigkeit, sondern nur darum, dass Höhen Transformationen in diesen Randgebieten überhaupt ermöglicht werden. Deshalb wurde diese Erweiterung auch ziemlich einfach realisiert, indem dort einfach die Quasigeoidhöhen aus dem europäischen Modell EGG97 eingefügt wurden. Dies ist natürlich nicht streng korrekt und verursacht wegen den unterschiedlichen Höhensystemen und der Nichtberücksichtigung des Unterschiedes zwischen Geoid und Quasigeoid teilweise auch Sprünge von mehr als 10 cm. Für den Bedarf des TLM genügt dies jedoch.

Auf ähnliche Weise wurde auch der Perimeter der drei Teilgitter von HTRANS erweitert. Die Bouguer-Anomalien (höhenabhängiger Anteil) wurden aus dem Datensatz des BGI berechnet, der lageabhängige Anteil wurde aus den Schweizer Daten extrapoliert und der Korrekturteil wurde vernachlässigt.

Ab 2010 wurde auch an alle externen Benutzer die Gitterdatei mit dem erweiterten Perimeter abgegeben.

### 12.2 Zusätzliche GPS/Nivellement-Punkte

Durch neue Nivellementmessungen ergibt sich oft eine relativ einfache Möglichkeit, neue GPS/Nivellement-Punkte einzurichten, welche gut zur Überprüfung der Genauigkeit des Geoidmodells dienen können. Diese Nivellementlinien sind meist kantonale Linien oder Linien, welche im Auftrag des BAFU gemessen wurden. Auch diese Linien werden in die Gesamtausgleichung von LHN95 integriert und es werden Schweremessungen durchgeführt. Die GPS/Nivellement-Punkte ergeben sich durch Anschluss von LV95-Punkten ans Landesnivellement oder durch eine kleine GPS-Kampagne auf speziell eingerichteten Punkten.

In Tabelle 12-1 sind die so zwischen 2005 und 2014 entstandenen GPS/Nivellement-Punkte aufgelistet. Ein Blick auf die Residuen (Differenz aus orthometrischer Höhe aus LHN95 minus orthometrischer Höhe aus GPS und CHGeo2004) gibt einen Überblick über die Genauigkeit des Geoidmodells und wie gut das Ziel eines konsistenten Höhenrahmens erreicht wurde. Die mittlere verbleibende Restklaffe beträgt 1.7 cm, was befriedigend ist. Sehr gut stimmt der Vergleich in einigen schwierigen Gegenden wie dem Maggital (Punkte Maggia und Cavigno), im Berner Oberland (Zweilütschinen, Grindelwald, Stechelberg) oder in der Zentralschweiz (Engelberg, Emmetten, Muotathal). Auch im Unterengadin und auf dem Flüelapass sind die Resultate befriedigend. Auf dem Ofenpass wurden 2 Punkte unabhängig voneinander bestimmt, welche beide Residuen von mehr als 3 cm aufweisen. Dies ist ein Hinweis auf eine Ungenauigkeit im Geoidmodell. Mit einem Residuum von fast 7 cm passt der Höhenrahmen auf dem LV95-Verdichtungspunkt Monteggio ziemlich schlecht. Dort stützt sich das Geoid vor allem auf Lotabweichungsmessungen in Bedigliora und in Luino. Eine gelegentliche Überprüfung dieser Messungen wäre sicher wertvoll. Ebenfalls recht enttäuschend ist die Restklaffe von 2 cm auf der AGNES-Station auf dem Oberalppass, da in unmittelbarer Nähe (ca. 250 m) der LV95-Punkt Oberalp als Stützpunkt für die Geoidbestimmung verwendet wurde. Diese Differenz bedarf sicher noch einer genaueren Untersuchung.

Alle diese neueren Punkte sind noch nicht streng in eine Gesamtausgleichung des GPS-Netzes oder des Landesnivellements integriert. Je nach Auswertung (z.B. verwendetes Antennenmodell) werden leicht

unterschiedliche Resultate erhalten. Eine weitere Fehlerquelle ist auch die Berücksichtigung der Vertikalbewegungen. LHN95 wird mit dem Geschwindigkeitsmodell immer auf die Epoche 1993 zurückgerechnet, während bisher die verwendeten GPS-Resultate immer als statisch - gültig für die Epoche der Messungen - betrachtet wurden. Schon dies kann inzwischen Diskrepanzen von einigen cm verursachen. Das Geoidmodell wird bisher ebenfalls als statisch betrachtet, was natürlich auch nicht absolut zutreffend ist.

Es ist zu erwähnen, dass auch alle übrigen, in CHGeo2004 verwendeten GPS/Nivellement-Punkte durch Neumessungen des Nivellementanschlusses und durch die GPS-Kampagne CHTRF2010 neue Höhen erhalten haben. Mit wenigen Ausnahmen sind diese Höhenänderungen aber auf stabilen Punkten kleiner als 1 cm.

**Tabelle 12-1:** Nach der Publikation von CHGeo2004 gemessene GPS/Nivellement-Punkte und deren Residuen

Ort	Pkt.Nr. Niv.	GPS/Niv. Residuen [cm]	Herkunft, Bemerkungen
Engelberg	OW 14s	-1.0	Landesnivellement 2005
Emmetten	NW 77	2.5	Landesnivellement 2005
Muotathal	SZ 16s	-2.1	Kant. Nivellement / Auftrag BAFU 2005
Monteggio	TI 637	-6.9	Landesnivellement 2006
Maggia	TI 200s	-1.3	Kant. Nivellement / Auftrag BAFU 2007
Caveragno	TI 201s	-0.2	Kant. Nivellement / Auftrag BAFU 2007
Gaster	SG 690	-0.8	nivelliert 2008
Montlingen	SG 657a	-0.1	nivelliert 2009
Pass dal Fuorn	GR3 565	3.9	nivelliert 2012
Einsiedeln	SZ 185	-1.5	Landesnivellement 2013
Schiers	GR2 353	0.0	nivelliert 2014
Zweilütschinen	BEO 1047	-1.2	Auftrag BAFU 2012-2014
Grindelwald	BEO 1094	-0.7	Auftrag BAFU 2012-2014
Stechelberg	BEO 1159	-0.1	Auftrag BAFU 2012-2014
Oberalp AGNES	GR1 578	-2.1	Anschluss AGNES-Station 2014
Flüelapass	GR3 273 exz	-0.7	Masterarbeit 2011
Sent	GR3 312 exz	-0.2	Masterarbeit 2011
Ramosch	GR3 318 exz	-0.4	Masterarbeit 2011
Sclamischo	GR3 326 exz	3.7	Masterarbeit 2011
Ofenpass	GR3 357 exz	3.5	Masterarbeit 2011
Pfunds (A)	A 38610 exz		Masterarbeit 2011, noch nicht nivelliert

### 12.3 Arbeiten für den Gotthard-Basistunnel

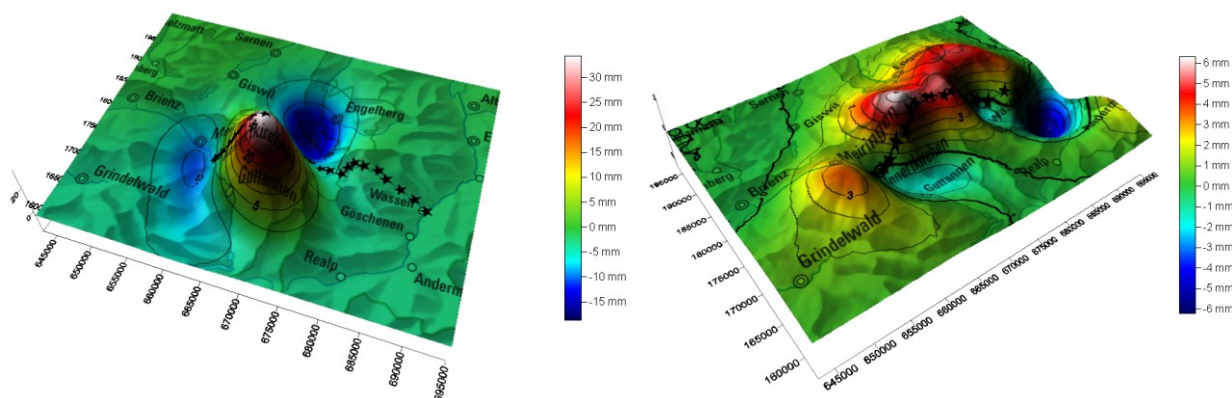
Für das Grundlagenetz des Gotthard-Basistunnels wurden 2005 (neben Schwere- und Azimutmessungen) auch einige Lotabweichungen im Bereich der Tunnelportale bestimmt (siehe Bürki et al. 2005). Zum Einsatz kamen die beiden digitalen Systeme DIADDEM der ETH Zürich und TZK2-D der Universität Hannover. Bei 4 der 5 Portalpunkte in Bodio, Faido, Amsteg und Erstfeld wurde mit beiden Kameras gemessen, in Sedrun nur mit dem System der ETHZ. Der Vergleich der Resultate der beiden Kameras zeigte auf, dass die Genauigkeit in der Grössenordnung von 0.1" liegt. Der Vergleich mit den aus CHGeo2004 gerechneten Lotabweichungen ergab eine maximale Abweichung von 1" in Sedrun (siehe Tabelle 12-2).

**Tabelle 12-2:** Aus CHGeo2004 interpolierte und gemessene Lotabweichungen und deren Differenzen

Differenzen Lotabweichungen (CHGeo2004) - LA beobachtet (CH1903+, Kartennord)						
	Modell CHGeo2004		gemessen		Modellabweichung CHGeo2004-gemessen	
Stationen	$\xi$ ber. ["]	$\eta$ ber. ["]	$\xi$ beob. ["]	$\eta$ beob. ["]	$d\xi$	$d\eta$
<b>Bodio</b>	3.96	13.69	3.97	14.13	<b>-0.01</b>	<b>-0.44</b>
<b>Faido</b>	-7.75	7.86	-7.31	8.55	<b>-0.44</b>	<b>-0.69</b>
<b>Erstfeld</b>	16.87	10.25	16.74	10.88	<b>-0.13</b>	<b>-0.63</b>
<b>Amsteg</b>	18.62	-9.67	18.93	-9.03	<b>-0.31</b>	<b>-0.64</b>
<b>Sedrun</b>	1.04	4.43	2.05	4.47	<b>-1.01</b>	<b>-0.04</b>

### 12.4 Arbeiten am Sustenpass

Das Gebiet des Sustenpasses wurde bereits bei der Berechnung des Geoidmodells CHGeo1998 als problematisch erkannt, da sich zwischen den beiden GPS/Nivellement-Stationen in Wassen und in Wyler ein Zwang von ca. 10 cm ergab. Deshalb wurden bereits in der Zenitkamera-Kampagne 2003 [Marti et al. 2004] in dieser Gegend mehrere Punkte gemessen. Das Problem wurde dadurch – und durch die GPS-Kampagne CHTRF2004 – zwar teilweise gelöst, es verblieben aber doch noch einige offene Fragen. Deshalb wurde im Jahr 2007 ein spezielles Projekt zur Verbesserung des Geoidmodells in diesem Gebiet durchgeführt. Dieses erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit an der ETH Zürich [Ganz, 2007]. Dabei sollte ein Lotabweichungsprofil mit dem digitalen Zenitkameranystem DIADEM über den Pass mit einem sehr geringen Punktabstand gemessen werden und daraus ein lokales Geoidmodell gerechnet werden. Aufgrund der schlechten Wetterbedingungen konnten nicht alle vorgesehenen Messungen durchgeführt werden, aber es kamen doch 22 neue Stationen mit einem mittleren Punktabstand von 1.5 km hinzu, und das Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Vier der neuen Stationen waren praktisch identisch mit Stationen aus der Kampagne CHGeo2003. Durch diese Wiederholungsmessungen konnte die hohe Genauigkeit des DIADEM von 0.1" – 0.2" bestätigt werden. Allerdings wurde auch eine falsche geodätische Koordinate des Punktes in Gadmen aufgedeckt, welche direkte Auswirkungen auf das Geoidmodell CHGeo2004 hatte. Die Geoidhöhen wurden durch diesen Fehler in der Umgebung um bis zu 3 cm verfälscht und sind noch bis in eine Entfernung von 15 km von Gadmen signifikant sichtbar. Alle weiteren neuen Lotabweichungsstationen änderten dann das Geoidmodell nur noch in einem Bereich von  $\pm 6$  mm. Beim Vergleich einer reinen astrogeodätischen Lösung mit einer durch GPS/Nivellement gestützten Lösung zeigte sich, dass sich auf der Westseite des Passes zwischen Innertkirchen und der Passhöhe praktisch keine Änderungen ergeben, auf der Ostseite treten hingegen Unterschiede von bis zu 20 mm auf. Dies liess darauf schliessen, dass möglicherweise der GPS/Nivellement-Punkt in Wassen nicht die erforderliche Genauigkeit aufwies.



**Abbildung 12-1:** links: Auswirkung der fehlerhaften Lotabweichung in Gadmen auf das Geoidmodell; rechts: Auswirkung der Lotabweichungsmessungen 2007 auf das Geoidmodell (aus [Ganz, 2007])

## 12.5 Geoidbestimmung im Unterengadin

Die grösste Unsicherheit des Geoidmodells CHGeo2004 und die grössten Diskrepanzen zwischen Lotabweichungen und GPS/Nivellement treten im Unterengadin auf. Um diese Situation näher zu untersuchen, wurde 2011 eine Kampagne in Zusammenarbeit mit der ETH und der Universität Zürich durchgeführt. Dabei wurden mit DIADEM einige neue Lotabweichungen gemessen und auch zusätzliche GPS/Nivellement-Punkte bestimmt. Die Messungen und Resultate sind in [Lindegger, 2011] beschrieben.

Die astronomischen Messungen wurden in zwei Nächten im Mai 2011 durchgeführt. Dabei wurden fünf Stationen im Unterengadin aber auch eine in Österreich und drei in Italien gemessen. Dabei war ein Punkt in Pradella ein bereits 2003 mit DIADEM vermessener Punkt. Auch hier zeigte sich die hohe Qualität von DIADEM, da Unterschiede von weniger als 0.1" auftraten. Die Messungen in der Schweiz im oberen Bereich (Ftan, Tarasp und Pradella) stimmen sehr gut mit dem Modell überein, während sich im unteren Bereich (Plattamala, Sclamischot) systematische Unterschiede zeigen (siehe Tabelle 12-3). Die neu gemessenen Lotabweichungen in Italien und in Nauders zeigen grössere systematische Differenzen in der Grössenordnung von 10" zu den prädierten Werten. Dies hat den Grund darin, dass diese Punkte ausserhalb des von CHGeo2004 abgedeckten Gebietes liegen. Diese Messungen werden aber bei einer zukünftigen Geoidbestimmung sehr nützlich sein. Die Lotabweichungen wurden als astrogeodätisches Nivellement zwischen Zernez und Vinadi auch unter Einbezug der älteren Messungen ausgewertet. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung im Bereich zwischen Zernez und Ramosch. Danach ergeben sich aber systematische Unterschiede von mehr als 1" zwischen den gemessenen Lotabweichungen und denjenigen, welche aus CHGeo2004 interpoliert wurden. Dies zeigt noch einmal den Zwang auf, welcher in diesem Gebiet immer noch in den Daten steckt.

Bei den GPS/Nivellement-Punkten wurde die Erweiterung im Unterengadin durch drei neue Punkte in Ramosch, Sclamischot und Sent erreicht. Zudem wurden noch zwei Punkte auf dem Flüelapass und auf dem Ofenpass gemessen. Ein sechster GPS-Punkt in Pfunds (Österreich) konnte nicht verwendet werden, da er noch nicht an das Nivellement angeschlossen wurde. Diese Punkte sind in Tabelle 12-1 integriert. Die Differenzen zwischen den direkt beobachteten Geoidhöhen auf diesen Punkten und den aus CHGeo2004 berechneten Werten betragen meist weniger als 1 cm. Nur auf den Punkten in Sclamischot und auf dem Ofenpass treten Unterschiede von ca. 3.5 cm auf. Auf dem Ofenpass ist diese Differenz durchaus plausibel, da es in dieser Gegend bisher noch keinen GPS/Nivellement-Punkt gab. Der Unterschied in Sclamischot lässt sich hingegen bisher nicht restlos klären. Die wahrscheinlichste Ursache ist eine ungenaue GPS-Höhe.

Der bestehende systematische Unterschied zwischen den verschiedenen Datensätzen konnte in dieser Arbeit nicht restlos geklärt werden. Es konnte aber ausgeschlossen werden, dass ein grober oder systematischer Fehler in den GPS/Nivellement-Daten steckt. Eine starke Vermutung besteht, dass die astrogeodätische Messung von 1992 auf dem LV95-Punkt in Ramosch fehlerhaft sein könnte und einen starken Einfluss auf die Lösung weiter talabwärts haben könnte. Diese Messung ist bei Gelegenheit zu überprüfen.

**Tabelle 12-3:** Gemessene Lotabweichungen im Unterengadin 2011 und Vergleich mit CHGeo2004

Differenzen Lotabweichungen (CHGeo2004) - LA beobachtet (Datum ETRS89)						
Stationen	Modell CHGeo2004		gemessen		Modellabweichung CHGeo2004-gemessen	
	$\xi$ ber. ["]	$\eta$ ber. ["]	$\xi$ beob. ["]	$\eta$ beob. ["]	d $\xi$	d $\eta$
<b>Ftan</b>	-8.49	2.77	-8.31	2.54	<b>-0.18</b>	<b>0.23</b>
<b>Tarasp</b>	-0.22	0.02	0.07	0.04	<b>-0.29</b>	<b>-0.02</b>
<b>Pradella</b>	5.58	-2.97	5.70	-2.92	<b>-0.12</b>	<b>-0.05</b>
<b>Plattamala</b>	2.62	-3.10	3.77	-3.21	<b>-1.15</b>	<b>0.11</b>
<b>Sclamischot</b>	1.94	-0.41	4.09	-1.70	<b>-2.15</b>	<b>1.29</b>
<b>Prato (I)</b>	8.49	14.19	13.12	0.84	<b>-4.63</b>	<b>13.35</b>
<b>Mals (I)</b>	-4.23	8.08	-6.95	-1.67	<b>2.72</b>	<b>9.75</b>
<b>Haidensee (I)</b>	-4.03	7.1	-4.10	-2.29	<b>0.07</b>	<b>9.39</b>
<b>Nauders (A)</b>	5.15	-0.01	5.88	-8.12	<b>-0.73</b>	<b>8.11</b>

## 13 Zusammenfassung, Ausblick

Das Geoidmodell CHGeo2004 wurde aus einer Kombination von Lotabweichungen, Schweremessungen und GPS/Nivellement berechnet. Die Beobachtungen wurden um den Einfluss der Topografie, des globalen Referenzmodells EGM96 und weiterer lokaler Massen reduziert. Für die Prädiktion wurde die Kollokation nach kleinsten Quadraten verwendet. Bei der publizierten Schlusslösung wurden die guten GPS/Nivellement-Beobachtungen praktisch als fest eingeführt. Dies führt zu einem konsistenten Höhensystem zwischen den orthometrischen Höhen aus dem Nivellement und den orthometrischen Höhen aus GPS und dem Geoid. Die Genauigkeit des Geoidmodells liegt im Mittel über die ganze Schweiz in der Grössenordnung von 1-3 cm. Dies ist vor allem durch die nach der Publikation des Modells gemessenen GPS/Nivellement-Punkte verifiziert, obwohl in einigen Gegenden auch grössere Residuen auftreten. Zum Vorgängermodell CHGeo98 sind die Differenzen im Flachland meist kleiner als 4 cm. In einigen Gebirgsgegenden können Unterschiede von mehr als 10 cm auftreten, und im Unterengadin sind die Differenzen grösser als 20 cm. Der grösste Teil dieser Unterschiede ist durch die starke Zwängung von CHGeo2004 auf die GPS/Nivellement-Punkte verursacht. Insbesondere im Unterengadin bestehen weiterhin systematische Diskrepanzen zu den Lotabweichungen, welche noch nicht wirklich geklärt sind.

Das berechnete Geoidmodell CHGeo2004 wird seit 2005 in Form von regelmässigen Gittern (eines in einer Auflösung von 1km im Schweizer Projektionssystem, das andere in einer 30"-Auflösung in ETRS89) an die Benutzer abgegeben und hat sich in der Praxis bei den GPS-Benutzern in der Schweiz seither bewährt. Da LN02 aber weiterhin der offizielle Höhenrahmen der amtlichen Vermessung bleibt, wird auch die Höhentransformation zwischen LHN95 und LN02 noch für längere Zeit benötigt. Diese Transformation wird mit dem Programm HTRANS (heute integriert in REFRAME und GeoSuite) ermöglicht, welches sich bisher aber nur auf Punkte des Landesnivellements stützt. In der Nähe der Linien funktioniert die Transformation im cm-Bereich. Abseits der Linien können aber durchaus Unterschiede von mehr als 10 cm auftreten. Eine zukünftige Verdichtung des in HTRANS verwendeten Datensatzes ist deshalb sicher eine sinnvolle Erweiterung.

Obwohl das Modell CHGeo2004 für die meisten Anwendungen in der Praxis eine ausreichende Genauigkeit aufweist, gibt es doch noch einige Schwachstellen. Dies hat sich insbesondere an den nachträglich bestimmten GPS/Nivellement-Punkten gezeigt. Zwar sind die verbleibenden Residuen im Mittel etwa bei 1.7 cm, es gibt aber Gegenden, wo noch systematische Unterschiede festgestellt wurden, so zum Beispiel im Malcantone (Punkt Monteggio, fast 7 cm) oder auf dem Ofenpass (über 3 cm).

Für ein zukünftiges, verbessertes Geoidmodell ist es recht schwierig, noch neue sinnvolle GPS/Nivellement-Punkte zu bestimmen, solange man sich nur auf die Linien des Landesnivellements stützt. Auf diesen Linien sind die Unterschiede zwischen ellipsoidischen und orthometrischen Höhen recht gut bekannt. Im Verlauf der Berechnung von CHGeo2004 wurden nur sehr wenige Regionen entdeckt, in welchen sich neue Punkte eventuell noch lohnen (z.B. Schüpfen, Freiberge, St.Gingolph, eventuell im Kanton Genf bei Meyrin oder Moillesulaz). Sinnvoll wäre die Einrichtung neuer Punkte eher auf kantonalen Nivellements, welche aber zunächst noch in LHN95 mit schwerer reduzierten Höhen eingeführt werden müssten.

Eine Unschönheit in der bisherigen Geoidberechnung ist auch die unterschiedliche Behandlung der Vertikalbewegungen im Nivellement und im GPS-Netz. LHN95 wurde bisher immer auf die Epoche 1993.0 bezogen, während das GPS-Netz LV95 grundsätzlich immer zum Zeitpunkt der Messung gültige Höhen liefert. Zwar werden inzwischen auch für die GPS-Punkte Geschwindigkeiten berechnet, diese sind aber bisher bei der Geoidberechnung nicht berücksichtigt worden. Dies kann Diskrepanzen von einigen cm verursachen.

Eine weitere, relativ einfache und billige Verbesserung des Geoidmodells ist durch neue Lotabweichungsmessungen möglich. Digitale Zenitkameras wie DIADEM oder dessen Nachfolger CODIAC erreichen Genauigkeiten im Bereich von 0.1" in relativ kurzer Zeit, so dass es möglich ist, bis zu 10 Stationen pro Nacht zu beobachten. Sinnvoll ist eine Ergänzung mit neuen Lotabweichungen in Gegenden, wo noch Probleme im Geoidmodell vorhanden sind (z.B. südliche Seitentäler des Wallis und Aostatal, einige Täler im Tessin), dort wo nur sehr alte Messungen vorhanden sind (z.B. Jungfrauregion, einige Gebiete der Kantone Luzern und Aargau) oder in Gegenden, welche nicht genügend gut durch Schweremessungen abgedeckt sind (einige Gebiete in den Kantonen Graubünden, Glarus und Schwyz).

In der Zwischenzeit gibt es auch das hochauflösende globale Modell EGM2008, welches als Referenz verwendet werden kann und schon den allergrössten Teil des Signals des Schwerefeldes enthält. Damit muss man sich in einer regionalen Geoidbestimmung fast nur noch um kleine lokale Störungen kümmern. Ein höher auflösendes Geländemodell (z.B. swissAlti3D statt DHM25) bringt wohl kaum eine wesentliche

Verbesserung der Geoidberechnung, hingegen wäre dies bei der Schwereinterpolation ein Fortschritt. Wichtiger wäre die Einführung eines verbesserten Dichtemodells insbesondere der Quartärtäler und die Verwendung der aktuellsten Bathymetriedaten für die grössten Seen. Auch sind bisher die Eismassen der Gletscher nur ungenügend modelliert, was zu lokalen Schwierigkeiten in der Geoidbestimmung führt, da in diesen Regionen meist nur sehr wenige Messungen vorhanden sind.

Die Kollokation nach kleinsten Quadraten hat sich als Berechnungsmethode bewährt und ist mit modernen Computern für ein kleines Land wie die Schweiz noch gut anwendbar. Hingegen wäre es besser, alle Berechnungen von Massenmodellen streng ellipsoidisch zu berechnen, um auch eventuelle Einflüsse der Projektionsverzerrung auszuschliessen und den Perimeter der Massenmodelle (insbesondere der Topografie) noch auszuweiten, um Randeffekte zu minimieren.

## Referenzen

- Bürki B., Ganz M., Hirt Ch., Marti U., Müller A., Radogna PV., Schlatter A., Wiget A. (2005): Astrogeodätische und gravimetrische Zusatzmessungen für den Gotthard-Basistunnel. swisstopo-Report 05-34. Bundesamt für Landestopografie, 2005.
- Brockmann E. (2003): CHGeoid2003. Planung und Auswertung der GPS Messungen. swisstopo-Report 03-30. Bundesamt für Landestopografie, 2003.
- Denker H, Torge W. (1998): The European gravimetric quasigeoid EGG97 – An IAG supported continental enterprise. IAG Symposia 119: 249-254, Springer Verlag.
- Forsberg R. (1994): Terrain Effects in Geoid Computations. In: International School for the Determination and Use of the Geoid. Lecture Notes. Milano, 1994.
- Ganz M. (2007): Geoidbestimmung am Sustenpass. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, 2007.
- Guillaume S. (2015): Determination of a Precise Gravity Field for the CLIC Feasibility Studies. Dissertation ETH No. 22590, 2015.
- Hirt C, Featherstone W., Marti U (2010) Combining EGM2008 and SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data to improve quasigeoid computations in mountainous areas devoid of gravity data, *J Geod* 84(9): 557-567, doi: 10.1007/s00190-010-0395-1.
- Lemoine F., Kenyon S., Factor J., Trimmer R., Pavlis N., Chinn D., Cox C., Klosko S., Luthcke S., Torrence M., Wang Y., Williamson R., Pavlis E., Rapp R., Olson T. (1998). The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. NASA/TP-1998-206861.
- Lindegger B. (2011): Zur Problematik der Geoidbestimmung im Unterengadin. Masterarbeit GEO 511. Geographisches Institut der Universität Zürich. Abteilung Fernerkundung, 2011.
- Marti U. (1997): Geoid der Schweiz 1997. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 56. Schweizerische Geodätische Kommission, 1997.
- Marti U. (1998): Das Geoid der Schweiz 1998. Technische Ergänzungen zur Neuberechnung des Geoids der Schweiz. Technischer Bericht 98-25. Bundesamt für Landestopografie, 1998.
- Marti U. (2002a): Aufbau der neuen Landesvermessung LV95. Teil 10: Das Geoid der Schweiz 1998 „CHGeo98“. swisstopo-Doku Nr. 16. Bundesamt für Landestopografie, 2002.
- Marti U. (2002b): LHN95: Übergang zwischen den Höhensystemen LN02 und LHN95. swisstopo-Report 01-32. Bundesamt für Landestopografie, 2002.
- Marti U. (2003): Projekt LHN95: Der Übergang zwischen den Höhenrahmen LN02 und LHN95. Anpassungen und weitere Testberechnungen. swisstopo-Report 03-10. Bundesamt für Landestopografie, 2003.
- Marti U., Hirt C., Müller A., Bürki B. (2004): CHGeoid2003: Astrogeodätische Messungen mit digitalen Zenitkameras vom 7.-29. Oktober 2003. swisstopo-Report 03-33. Bundesamt für Landestopografie, 2004.
- Olivier R., Dumont B., Klingelé E. (2010): L'atlas gravimétrique de la Suisse. Géophysique N.43. Contribution à la géologie de la Suisse. ISSN 0253-1186. Schweizerische Geophysikalische Kommission, 2010.
- Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. (2012): The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) -; *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012) Volume 117, Issue B4, April 2012.
- Ray J., Marti U. (2007): REFRAME. Bezugsrahmenwechsel in Lage und/oder Höhe. swisstopo-Manual 07-d. Bundesamt für Landestopografie, 2007 (mit Nachführung 2009).
- Ray J. (2012): GeoSuite. swisstopo-Manual 10-d. Bundesamt für Landestopografie, 2012 (mit Nachführung 2013).
- Schlatter A., Mattli B., Vogel B. (2003): Landeshöhennetz LHN95. Die Anschlüsse des GPS-Netzes LV95 und der AGNES-Stationen an das Landeshöhennetz (LHN95 und LN02). swisstopo-Report 02-33. Bundesamt für Landestopografie, 2003.



- Schlatter A., Mattli B., Kistler M. (2005): CHGeoid2003. GPS/Nivellement Rekognoszierung, Versicherung, Nivellement-Anschlussmessungen und Punktdokumentation. swisstopo-Report 03-32. Bundesamt für Landestopografie, 2005.
- Schlatter A (2007): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten der Schweiz, Band 72. Schweizerische Geodätische Kommission, 2007.
- Schneider D., Brockmann E., Marti U., Schlatter A. (2002): GPS-Geoid 2003 (CHGeo2003). Konzertierte Aktion für eine gezielte Verbesserung des Geoidmodells im Rahmen der neuen Landesvermessung LV95. swisstopo-Report 02-16. Bundesamt für Landestopografie, 2002.
- Wirth B. (1990): Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten der Schweiz, Band 42. Schweizerische Geodätische Kommission, 1990.



## **Anhang A1**

### **A1 Zusammenstellung der verwendeten GPS/Nivellement-Punkte**



In dieser Tabelle sind die GPS/Nivellement-Punkte aufgelistet, wie sie für die Berechnung von CHGeo2004 verwendet wurden. Die beobachteten Geoidhöhen sind hier in CH1903+ (LV95) angegeben. Die Kolonne dH ist der (orthometrische) Höhenunterschied zwischen dem Nivellement- und dem GPS-Punkt. Oft ist diese Differenz 0, da die Punkte meistens identisch sind. Falls die Differenz nicht 0 ist, so sind dies entweder Masthöhen bei den AGNES-Stationen, Kugelkorrekturen (-1.563 cm) bei einigen Punkten im Oberwallis oder der Höhenunterschied aus einem lokalen Nivellement, falls die GPS-Antenne nicht direkt auf dem Nivellement-Punkt stationiert werden konnte.

Die Kolonne V gibt an, wie der Punkt in der Geoidberechnung verwendet wurde. V: Geoid wurde in der definitiven Lösung auf diesen Punkt stark gezwängt; R: mit reduziertem Gewicht in Berechnung verwendet; E: aus den Berechnungen eliminiert.

Niv.-Pkt.	GPS-Punkt	Name Geoidpunkt	H. ell. LV95	H. orth. LHN95	dH Niv-GPS	Beob. Geoidh.	V
SH 106	1031.366	Siblingen	516.7156	514.9939	0.0000	1.7217	V
BS 41	1047.700	Chrischona	457.1381	455.9147	0.0000	1.2234	V
AG 70s	1049.400	Laufenburg	360.7141	359.5160	0.0000	1.1981	V
SH 107	1051.600	Buchberg	525.6618	524.9007	0.0000	0.7611	V
SG 658	1075.400	Goldach	501.0183	500.6622	0.0000	0.3561	V
AUT 1	1076.800	Pfänder	1043.6172	1042.5276	0.0000	1.0896	V
JU 188	1085.700	Les Rangiers	839.1096	838.3907	0.0000	0.7189	V
ZH 76s	1091.300	Hönggerberg	528.1871	528.2036	0.0000	-0.0165	V
SG 657	1096.100	Montlingen	420.0233	419.5210	0.0000	0.5023	V
SO 215	1107.300	Riedholz	514.0403	513.9267	0.0000	0.1136	V
LU 357	1129.500	Knutwil	578.0420	578.3639	0.0000	-0.3219	V
AG 636	1130.800	Sins	427.1376	427.6498	0.0000	-0.5122	V
SZ 171	1151.500	Oberarth	455.4134	455.6224	0.0000	-0.2090	V
GL 146	1153.700	Glarus	521.5135	520.7734	0.0000	0.7401	V
SG 653	1155.500	Sargans	514.7824	514.0053	0.0000	0.7771	V
BES 499	1168.100	Signau	706.0139	706.2988	0.0000	-0.2849	V
VDO 455	1182.621	Col des Etroits	1165.8155	1166.0449	0.0000	-0.2294	V
BES 498	1186.800	Zimmerwald	906.5501	897.9061	9.1895	-0.5455	V
UR 308	1192.000	Altdorf	458.3587	457.4950	0.0000	0.8637	V
UR 309	1193.000	Klausenpass	1956.9456	1955.3296	0.0000	1.6160	V
GR1 530	1195.300	Bonaduz	663.8483	662.8916	0.0000	0.9567	V
GR2 309	1197.300	Davos	1564.0824	1561.3763	0.0000	2.7061	V
BEO 596	1207.500	Thun	562.0523	562.3711	0.0000	-0.3188	V
BEO 597	1209.500	Brienz	649.8377	648.9887	0.0000	0.8490	V
GR3 483	1218.400	Zernez	1565.2414	1561.4676	0.0000	3.7738	V
VDO 454	1221.600	Le Lieu	1052.4566	1052.9635	0.0000	-0.5069	V
VDO 457	1222.700	La Sarraz	534.7072	535.7870	0.0000	-1.0798	V
FR 360	1225.200	La Tour-de-Trême	747.9703	748.4745	0.0000	-0.5042	V
UR 311	1232.200	Oberalp	2045.0431	2043.0076	0.0000	2.0355	V
GR1 531	1235.500	Andeer	1089.6509	1087.8050	0.0000	1.8459	V
VDO 456	1242.700	Echandens	448.7878	450.2394	0.0000	-1.4516	V
BEO 598	1246.041	Saanen	1115.2205	1114.6944	0.0000	0.5261	V
VSD 419	1250.700	Grimsel	2172.5448	2170.2354	0.0000	2.3094	V
TI 608	1251.706	San Gottardo neu	2103.9448	2101.7444	0.0000	2.2004	V
VDO 453	1260.800	La Givrine	1206.3677	1207.4730	0.0000	-1.1053	V
TI 527	1273.550	Biasca neu	380.1440	379.3031	0.0000	0.8409	V
GR3 481	1274.600	Mesocco	805.7292	804.3908	0.0000	1.3384	V
GR3 482	1276.600	Maloja	1813.2212	1810.5061	0.0000	2.7151	V
VDE 502	1284.700	St-Triphon	447.8843	448.3964	0.0000	-0.5121	V
VSD 420	1289.400	Simplon	2011.5258	2009.5963	0.0000	1.9295	V
VSF 335	1306.400	Sion	593.6444	593.1834	0.0000	0.4610	V
TI 514	1312.600	Ascona	219.1103	218.8511	0.0000	0.2593	V

Niv.-Pkt.	GPS-Punkt	Name Geoidpunkt	H. ell. LV95	H. orth. LHN95	dH Niv-GPS	Beob. Geoidh.	V
VSF 87s	1325.200	Martigny	574.4151	574.4051	0.0000	0.0100	V
VSF 336	1345.700	Bourg-St-Pierre	1631.2060	1629.8308	0.0000	1.3752	V
VSD 405	1348.100	Zermatt	1690.8028	1687.9440	-0.0156	2.8744	V
TI 512	1273.500	Biasca alt	290.1923	289.3786	0.0000	0.8137	E
SZ 91	1152.111.3	Rothenturm	922.0403	927.4034	-5.3772	0.0141	V
VSD 422	TURT_HP	Turtmann	623.7586	622.4889	-0.0156	1.2854	V
BEO 1t	1227.754	Tellenburg	845.6893	844.8364	0.0000	0.8529	V
VSD 366	1288.820	Lalden	651.8918	650.4027	-0.0156	1.5047	V
UR 310	1212.205	Amsteg	560.3339	558.8704	0.0000	1.4635	V
TI 515	1373.425	Stabio	378.8900	382.3000	0.0000	-3.4100	V
VSD 421	SUST_HP	Susten (VS)	677.8347	676.6630	-0.0156	1.1874	V
TI 513	1313.700	Bellinzona	275.3114	275.3065	0.0000	0.0049	V
AG 638	1070.261	Birrfeld	395.7020	395.3561	0.0000	0.3459	V
BEO 612	1226.558	Boltigen	834.2702	833.8466	0.0000	0.4236	V
NE 343	1164.222	Colombier	492.7894	493.1788	0.0000	-0.3894	V
OW 103	1190.030	Giswil	597.2600	596.5953	0.0000	0.6647	V
BEN 455	1147.338	Hindelbank	542.6263	543.1185	0.0000	-0.4922	V
ZH 426	1111.579	Kilchberg	499.0077	499.2999	0.0000	-0.2922	V
SG 660	1114.256	Krummenau	727.3268	726.9013	0.0000	0.4255	V
AG 637	1048.620	Möhlin	363.8119	362.5663	0.0000	1.2456	V
JU 189	1104.736	Muriaux	968.9620	968.2743	0.0000	0.6877	V
ZH 427	1071.424	Oberglatt	443.1141	442.7848	0.0000	0.3293	V
ZH 425	1111.162	Obfelden	467.0823	467.4830	0.0000	-0.4007	V
AG 639	1110.305	Sarmenstorf	625.9505	626.0971	0.0000	-0.1466	V
LU 361	1169.357	Schüpfheim	754.4701	754.4578	0.0000	0.0123	V
LU 374	1110.138	Schwarzenbach LU	687.7114	688.0444	0.0000	-0.3330	V
SG 659	1076.318	St. Margrethen	436.8084	436.2752	0.0000	0.5332	V
BEO 610	1211.215	Sustenpass	2266.3964	2264.3590	0.0000	2.0374	V
UR 319	1211.844	Wassen	878.4994	876.7129	0.0000	1.7866	V
BES 500	1187.445	Wichtrach	593.1127	593.6049	0.0000	-0.4922	V
BEO 611	1227.755	Wimmis	638.3572	638.2246	0.0000	0.1326	V
BEO 609	1210.344	Wyler	747.0447	745.5112	0.0000	1.5335	V
GR3 318	1143	GR3 318 (Ramosch)	1162.2825	1151.0889	6.8265	4.3672	R
OW 18	0712	OW 18 (Alpnach)	466.8311	470.3726	-3.7832	0.2417	R
TI 48	0792	TI 48 (Dalpe)	1001.4570	1012.3551	-12.8179	1.9198	R
BEO 448	0802	BEO 448 (Engstligenalp)	1181.9464	1174.2025	6.3069	1.4370	R
VSD 96	0812	VSD 96 (Fieschertal)	1058.9226	1053.1457	3.7508	2.0261	R
TI 367a	0822	TI 367A (Generoso)	269.5419	276.2561	-4.4899	-2.2243	R
BEO 2t	0852	BEKN 4212 (Grindelw.)	1244.9697	1229.1239	13.9472	1.8987	R
TI 455	0942	TI 455 (Sonvico)	555.9007	547.8745	8.2244	-0.1982	R
SG 640	9016	SG 640 (Bachtel)	446.6162	443.1552	3.6616	-0.2006	R
ZH 399	9036	ZH 399 (Buchberg)	393.0742	392.4319	-0.2111	0.8535	R
TG 249	9056	TG 249 (Dettighofen)	413.9850	415.3946	-1.9375	0.5279	R
SZ 149	9076	SZ 149 (Gaster)	424.4373	439.7894	-15.3700	0.0179	R
AG 535	9146	AG 535 (Lenzburg)	351.2088	361.7269	-10.8344	0.3163	R
TG 113	9166	TG 113 (Nollen)	454.1102	451.7745	1.9832	0.3525	R
SG 293	9176	SG 293 (Oberhelfen.)	586.6668	570.8944	15.5857	0.1867	R
ZH 85	9196	ZH 85 (Pfannenstiel)	425.3867	427.1238	-1.3290	-0.4081	R
TG 47	9205	TG 47 (Schauenberg)	488.1238	470.0895	17.7817	0.2526	R
SH 62	9226	SH 62 (Sibingen)	433.1260	433.0759	-1.4360	1.4861	R
SH 78	9246	SH 78 (Stammheim)	399.1009	401.4920	-3.3101	0.9190	R

Niv.-Pkt.	GPS-Punkt	Name Geoidpunkt	H. ell. LV95	H. orth. LHN95	dH Niv-GPS	Beob. Geoidh.	V
VDE 300a	9326	VDE 300A (Chailly)	386.2759	380.4132	6.8572	-0.9945	R
VDO 294	9356	VDO 294 (Echandens)	474.3456	469.6061	6.1651	-1.4256	R
VDO 40	9366	VDO 40 (Essertines)	392.2238	394.7370	-0.8732	-1.6400	R
JU 134	9376	JU 134 (Fahy)	427.1041	411.8651	14.5532	0.6858	R
FR 277	9386	FR 277 (Forel)	464.7703	456.1883	9.4520	-0.8700	R
FR 118	9396	FR 118 (Fribourg)	594.6674	590.5008	4.8924	-0.7257	R
BEN 302	9426	BEN 302 (Langenthal)	481.0445	484.5683	-3.3888	-0.1349	R
NE 97	9436	NE 97 (Chaux-de-Fonds)	1166.5652	1166.0627	0.2957	0.2067	R
VDO 253	9456	VDO 253 (La Sarraz)	475.4452	485.0223	-8.4854	-1.0917	R
LU 221a	9506	LU 221A (Menzberg)	717.7628	726.5330	-8.5962	-0.1740	R
BL 131	9516	BL 131 (Metzerlen)	336.3492	335.9797	-0.3760	0.7454	R
FR 235a	9526	FR 235A (Moudon)	690.7628	685.2971	6.5542	-1.0884	R
BEJ 20	9546	BEJ 20 (Reconvilier)	654.4126	654.0557	-0.0960	0.4529	R
VDE 247	9566	VDE 247 (Savigny)	407.7259	400.5583	8.5634	-1.3959	R
BEN 114	9576	BEN 114 (Seedorf)	462.9322	462.6054	0.8537	-0.5269	R
NE 217	9606	NE 217 (Travers)	728.9604	729.5390	-0.5724	-0.0062	R
FR 352	9626	FR 352 (Vully)	431.4254	463.5294	-31.4373	-0.6667	R
BL 1t	FHBB	FHBB	329.8164	328.7925	0.0000	1.0239	V
GR2 336	DAVO	DAVO	1598.0967	1594.0292	1.3680	2.6995	V
TI 609	1253.210	Olivone	1337.4235	1335.7808	0.0000	1.6427	V
GR3 488	1257.410	Samedan	1723.3121	1720.0704	0.0000	3.2417	V
GR2 340	1256.412	Sur	1570.4716	1567.8648	0.0000	2.6068	V
GR3 487	1296.103	Bondo	803.8962	802.1241	0.0000	1.7721	V
GR2 339	1215.631	Sils i.D.	722.9459	721.6051	0.0000	1.3408	V
GR3 484	1239.800	Santa Maria	1355.9002	1351.7233	0.0000	4.1769	V
GE 1	0001	Pierre du Niton	371.3092	373.5949	0.3716	-2.6573	V
BEJ 41s	1125.200	Chasseral	1598.0309	1597.6593	0.0000	0.3716	V
AG 42	AG_42_GPS	AG 42 (FRIC)	328.8919	328.1128	-0.5388	1.3179	V
AG 471	AG_471_GPS	AG 471 (Wartburg)	407.5832	398.2959	9.1228	0.1646	V
BL 19a	BL_20_GPS	BL 19A (FHBB)	284.6178	264.8835	18.6332	1.1011	V
BL 42	BL_42_GPS	BL 42 (Sissacherfluh)	371.5454	372.0853	-1.3892	0.8493	V
FL 103	FL_103_GPS	FL 103 (Eschen)	455.8587	450.5660	4.7121	0.5806	V
GE 52	GE_52_GPS1	GE 52 (GENE)	409.9117	405.9518	6.3932	-2.4333	V
GE 52	GE_52_GPS2	GE 52 (Bossy)	409.8011	405.9518	6.2827	-2.4334	V
GR1 410a	GR1_411_GPS	GR1 410A (SARG)	528.9743	528.4721	-0.4515	0.9537	V
GR2 338	GR2_338	GR2 338 (Filisur)	890.7692	888.9136	0.0000	1.8556	V
GR2 37	GR2_38_GPS	GR2 37 (Schiers)	994.5715	991.1265	1.2615	2.1835	V
JU 170	JU_170_GPS	JU 170 (BOUR)	485.9135	483.9039	1.3978	0.6119	V
SH 51	SH_50_GPS	SH 50 (SCHA)	434.3016	432.5964	0.1036	1.6016	V
SZ 150	SZ_148_GPS	SZ 150 (UZNA)	437.0235	439.6964	-2.7012	0.0282	V
TG 3	TG_3_GPS	TG 3 (Frauenfeld)	422.6162	416.6540	5.5631	0.3991	V
ZH 317	ZH_316_GPS	ZH 316 (Brütten)	516.0393	519.4588	-3.4419	0.0224	V
LU 378	LUZE	LUZE	493.7040	484.1517	10.0376	-0.4853	V
ITA 101	028701	Gran San Bernardo	2466.4457	2465.2226	0.0000	1.2231	R
GL 150	1173.633	Linthal	682.2940	681.0371	0.0000	1.2569	V
VDO 1t	EPFL B	EPFL	409.0820	410.6314	0.0000	-1.5494	V
TG 313	KREU	KREU	483.8545	477.1260	6.1143	0.6142	V
GR3 507	SANB	SANB	1653.1317	1645.2419	6.1112	1.7786	V
GR3 512	ARDE	ARDE	1499.4781	1494.1562	1.3322	3.9897	V
UR 286	UR_285_GPS	UR 285 (ANDE)	1470.6503	1467.4981	1.0686	2.0836	V
BEO 127	BEO_127_GPS	BEO 127 (Beatenberg)	588.3131	580.7731	6.9433	0.5967	R

Niv.-Pkt.	GPS-Punkt	Name Geoidpunkt	H. ell. LV95	H. orth. LHN95	dH Niv-GPS	Beob. Geoidh.	V
GR1 34a	GR1_34A_GPS	GR1 34A (Disentis)	1307.3159	1305.5100	0.0000	1.8059	V
GR1 463	GR1_463_GPS	GR1 463 (FALE)	704.5023	702.5321	0.8573	1.1129	V
NE 1t	NEUC B	NEUC	454.7608	455.1400	0.0000	-0.3792	V
NE 345	1163.400	Travers	786.7518	786.7845	0.0000	-0.0327	V
NE 346	1144.200	La Chaux-de-Fonds	1194.2823	1193.9340	0.0000	0.3483	V
JU 190	JU_190	Grandgourt	419.4905	418.8112	0.0000	0.6793	V
JU 191	JU_191	Choindez	480.4374	479.7864	0.0000	0.6510	E
NE 347	NE_347	Le Prévoux	1089.1669	1088.9084	0.0000	0.2585	V
NE 348	NE_348	Le Cernil	1178.4072	1178.3290	0.0000	0.0782	V
BS 1t	BS_1T	St. Louis	260.5541	259.4195	0.0000	1.1346	V
BL 154	BL_154	Liesberg Station	390.0482	389.3677	0.0000	0.6805	V
BEN 465	BEN_465	Biel	470.7465	470.7452	0.0000	0.0013	V
VDO 458	VDO_458	Chamblon	448.7569	449.6231	0.0000	-0.8662	V
VDE 506	VDE_506	Monts de Corsier	755.7665	756.6843	0.0000	-0.9178	V
VDO 2t	VDO_2T	L'Assé	467.9638	469.7531	0.0000	-1.7893	V
VDE 507	VDE_507	Les Diablerets	1182.0164	1181.5389	0.0000	0.4775	V
FR 1t	FR_1T	Lessoc Station	780.7513	780.9189	0.0000	-0.1676	V
VSF 337	VSF_337	Le Châtelard	1132.2943	1131.8809	0.0000	0.4134	V
VSD 379	VSD_379	Stalden	824.5899	822.8415	-0.0156	1.7640	V
VSD 423	VSD_423	Gondo	949.6554	947.8936	0.0000	1.7618	V
VSD 424	VSD_424	Fiesch-Mühlebach	1199.5148	1197.3974	0.0000	2.1174	V
VSD 425	VSD_425	Oberwald (Furka)	1472.6058	1470.2839	0.0000	2.3219	V
OW 104	OW_104	Telliogg	434.6598	434.7600	0.0000	-0.1002	V
BEN 1t	BEN_1T	Riedtwil	503.9934	504.2795	0.0000	-0.2861	V
SG 1t	SG_1T	Wil	576.4254	576.2051	0.0000	0.2203	V
GR1 1t	GR1_1T	Tavanasa-Waltensburg	770.4675	769.1155	0.0000	1.3520	V
GR1 549	GR1_549	Splügenpass	2122.1210	2120.1099	0.0000	2.0111	V
GR3 516	GR3_516	Vinadi	1063.6565	1058.9760	0.0000	4.6805	V
GR3 515	GR3_515	Ramosch	1147.1403	1142.7044	0.0000	4.4359	V
BEO 614	BEO_614	Guttannen	1216.2867	1214.0955	0.0000	2.1912	V
VSF 338	VSF_338	Grand St. Bernard	2476.7054	2475.4290	0.0000	1.2764	V
GR1 550	GR1_550	Parpan	1494.7513	1493.0840	0.0000	1.6673	V
SG 669	SG_670	Wagen/Eschenbach	461.2415	461.4238	0.0000	-0.1823	V
BEO 616	1208.733	Ringgenberg	609.2578	608.6271	0.0000	0.6307	V
BEJ 1t	BEJ_1T	Moutier	529.3047	528.8236	0.0000	0.4811	V
VDE 505	VDE_505	Bressonaz	532.2789	533.4024	0.0000	-1.1235	V
VDE 1t	PAYE B	PAYE	498.3274	499.2877	0.0000	-0.9603	V
BES 157a	BES_157A	Niederried	462.9759	463.5570	0.0000	-0.5811	V
BES 1t	1145.833	Kallnach	481.6392	482.1740	0.0000	-0.5348	V
GR2 350	1216.539	Filisur	1146.9049	1144.6796	0.0000	2.2253	V
TI 610	TI_610	Prato	832.8439	831.1322	0.0000	1.7117	V
UR 341	UR_341	Tiefenbach	2124.9885	2122.6696	0.0000	2.3189	V
TI 328	TI_328	Taverne	371.8561	372.5729	0.0000	-0.7168	V
TI 1t	TI_1T	All'Acqua	1614.6232	1612.3169	0.0000	2.3063	V
GR3 517	GR3_517	Campocologno	538.6728	536.2951	0.0000	2.3777	V
GR3 534	1278.200	Berninapass	2332.6890	2329.1763	0.0000	3.5127	V
GE 52	1281.000	Bossy	446.2820	405.9518	42.6395	-2.3092	V
TI 608	1251.700	San Gottardo alt	2111.1339	2101.7444	7.1825	2.2070	E
SH 1t	1011.816	Wiechs	707.0271	704.8845	0.0000	2.1426	V



## Berichte-Reihe zur neuen Landesvermessung LV95

Berichte aus der der L+T (bis 2002) / swisstopo-Doku		LV95-Reihe
Nr.	Titel (Autoren)	Ausgabe
6	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 1: Vorgeschichte, Entstehung des Projekts, Konzept und Planung</b> (D. Schneider, E. Gubler und A. Wiget)	1996
7	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 2: Geostation Zimmerwald: Satellite Laser Ranging (SLR) und GPS-Permanentbetrieb</b> (U. Wild und W. Gurtner)	1995
8	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 3: Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen</b> (D. Schneider, E. Gubler, U. Marti und W. Gurtner)	2001
8 f	Conception de la nouvelle Mensuration Nationale Suisse 'MN95': <b>Part 3: Système et cadre de référence</b> (D. Schneider, E. Gubler, U. Marti und W. Gurtner, Traduction par H. Dupraz)	2001
9	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 4: Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung 'DIA93'</b> (H. Chablais, Th. Signer und B. Vogel)	1995
11	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 5: GPS-Landesnetz: Netzanlage, Materialisierung, Dokumentation und Nachführung</b> (W. Santschi, B. Vogel, Th. Signer und D. Gutknecht)	1998
12	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 6: GPS-Landesnetz: GPS-Messungen 1988-94</b> (B. Vogel, A. Wiget, Th. Signer, D. Gutknecht und W. Santschi)	1997
13	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 7: GPS-Landesnetz: Auswertung der GPS-Messungen 1988-94; Bezugsrahmen 'CHTRF95' und 'LV95'</b> (A. Wiget, U. Wild, Th. Signer und B. Vogel)	2003
14	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 8: Gesamtausgleichungen des GPS-Landesnetzes mit dem Diagnosenetz der Triangulation 1. und 2. Ordnung 'DIA95'</b> (Th. Signer und B. Vogel)	2001
15	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 9: GPS-Landesnetz: Verdichtung und Bezug zur bisherigen Landesvermessung. Transformation 'LV95 &lt;-&gt; LV03'</b> (Th. Signer und B. Vogel)	1999
16	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 10: Das Geoid der Schweiz 1998</b> (U. Marti)	2003
19	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 11: Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES): Stationsnetz und Positionierungsdienste</b> (U. Wild, S. Grünig und R. Hug)	2006
20	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 12: Landeshöhennetz 'LHN95': Konzept, Referenzsystem, kinematische Gesamtausgleichung und Bezug zum Landesnivellement 'LN02'</b> (A. Schlatter und U. Marti)	2007
21	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 13: Einführung des Bezugsrahmens 'LV95' in die Nationale Geodateninfrastruktur</b> (B. Vogel, M. Burkard, M. Kistler, U. Marti, J. Ray, M. Scherrer, A. Schlatter und A. Wiget)	2009
22	Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': <b>Teil 14: Das Geoid der Schweiz 2004 „CHGeo2004“</b> (U. Marti)	2016

