

AlpTransit-Gotthard-Basistunnel: Aspekte zu den Themen Schwerefeld, Höhe und Geodynamik

AlpTransit Gotthard Base Tunnel: Aspects of Gravity Field, Heights and Geodynamics

Andreas Schlatter, Urs Marti, Adrian Wiget

Die neue Landesvermessung 1995 mit den Komponenten Automatisches GNSS-Netz der Schweiz (AGNES), GPS-Landesnetz LV95, Landeshöhennetz LHN95 und den Geoidmodellen CHGeo98/2004 ermöglichten, die alpenquerenden Basistunnel am Lötschberg, am Gotthard und am Ceneri mit einem minimalen Aufwand an zusätzlichen Grundlagenvermessungen zu erstellen. Der Beitrag fokussiert auf die Themen Schwerefeld, Landeshöhennetz und rezente Bewegungen der Oberfläche, deren korrekte Berücksichtigung zum Erfolg bei den Hauptdurchschlägen in der Höhe beitragen konnte. Zudem wird gezeigt, wie ein harmloser, potenzialtheoretischer und akademischer Feldversuch zur überraschenden Entdeckung von massiven Senkungen am Gotthardpass führte. Sie sind ein mahnendes Beispiel für die Größenordnung der Senkungen, welche die Gebirgsentwässerung an der Oberfläche von Tunneln mit großer Überdeckung verursachen kann.

Schlüsselwörter: AlpTransit-Gotthard-Basistunnel, Höhen-Grundlagennetz, Landesvermessung 1995, Landeshöhennetz LHN95, Geoidmodell CHGeo98, rezente Krustenbewegungen, Senkungen am Gotthardpass

The New National Survey 1995 (LV95) and its components, the Automated GNSS Network for Switzerland (AGNES), the GPS-based national control network LV95, the national height network LHN95 and the geoid models CHGeo98/2004 allowed the construction of base tunnels through the Alps (such as Lötschberg, Gotthard and Ceneri) with only minimal additional control surveys needed. This paper puts the focus on the gravity field, the national height network and recent movements of the earth's surface. These influences had to be taken into consideration for a successful breakthrough, especially in the vertical component. Moreover, it will be shown how a harmless, potentially theoretical and academic field trial led surprisingly to the discovery of a massive subsidence on the Gotthard Pass along the axes of the Gotthard road tunnel. This is a warning example of the order of magnitude of subsidence on the surface above tunnels with a large vertical covering, which may be caused by the drainage of rock masses.

Keywords: AlpTransit Gotthard base tunnel, control network LV95, national survey 1995, national height network LHN95, geoid model CHGeo98, recent crustal movements, subsidence at the Gotthard Pass

1 EINLEITUNG

Mit der Eröffnung und knapp sechs Jahre nach dem letzten Hauptdurchschlag am Gotthard-Basistunnel (GBT) lohnt es sich, nochmals die Beiträge der Schweizer Landesvermessung zum Gelingen dieses Jahrhundertprojekts vor Augen zu führen. Dank weiser

Voraussicht bei der Konzipierung der Grundlagenvermessung des GBT konnte von der neuen Landesvermessung LV95 enorm profitiert und die notwendigen Messungen auf ein Minimum beschränkt werden /Wiget et al. 2010/.

Der Beitrag konzentriert sich auf die Höhe im Zusammenspiel mit dem Schwerfeld sowie die Geodynamik im Alpenraum. Alleine die Länge – der GBT ist mit 57 km zurzeit der längste realisierte Eisenbahntunnel der Welt – wäre für eine erfolgreiche Höhenübertragung nicht kritisch. Da das Bauwerk aber den Alpenhauptkamm durchquert, Überdeckungen von über 2000 m aufweist und zusätzlich über einen 800 m tiefen Vertikalschacht erschlossen wird, führte dies dazu, den Einfluss des Schwerfelds auf die Höhen von Beginn an genau zu untersuchen und zu quantifizieren.

Zudem wird nochmals aufgezeigt, wie durch eine harmlose geodätische Fingerübung massive Senkungen am Gotthardpass direkt über dem darunterliegenden, 1980 eröffneten Straßentunnel festgestellt wurden. Eine Entdeckung, welche zurecht zur großräumigen Überwachung der Stauanlagen und des näheren Umfelds über dem im Bau stehenden Basistunnel führte.

2 DIE NEUE LANDESVERMESSUNG LV95

Die geodätische Landesvermessung ist eine der Hauptaufgaben des Bundesamts für Landestopografie swisstopo. Sie umfasst die Erstellung, Weiterentwicklung und Erhaltung der geodätischen Grundlagen, namentlich der terrestrischen Bezugssysteme und deren Realisierung durch Bezugsrahmen mittels geodätischer Fixpunkt- und Permanentnetze. Ab Mitte der 1980er-Jahre ermöglichten es die modernen Technologien der Satellitengeodäsie, insbesondere GPS, die Landesvermessung auf wirtschaftliche Art und Weise zu erneuern und dabei ihre Genauigkeit und Verwendbarkeit stark zu verbessern. swisstopo hat die Landesvermessung im Rahmen des Projekts Landesvermessung 1995 (LV95) erneuert /Signer 2002/. Die wichtigsten Projektziele waren: Die Definition der geodätischen Bezugssysteme CHTRS95 und CH1903+, die Fundamentalstation Zimmerwald, das GPS-Landesnetz, das Automatische GNSS-Netz Schweiz (AGNES), der Positionierungsdienst swipos, das Landeshöhennetz LHN95, das Landesschwerenetz LSN2004, das Geoidmodell der Schweiz CHGeo2004 und das kinematische Modell CHKM95.

Zwischen 1989 und 1995 hat swisstopo das GPS-Landesnetz mit über 200 stabil versicherten Punkten aufgebaut, gemessen und an internationale Referenznetze angeschlossen. Zusammen mit dem GNSS-Permanentnetz AGNES realisieren diese Punkte den neuen Bezugsrahmen der Landesvermessung LV95 (Abb. 1). Aus Vergleichsmessungen konnten Verzerrungen in der hundertjährigen Landestriangulation LV03 bis zu 1,5 m nachgewiesen werden. Demgegenüber ist die landesweite Genauigkeit (Standardabweichung) der Lagekoordinaten des Bezugsrahmens LV95 besser als 1 cm. Die neue Landesvermessung vermochte somit die Lagegenauigkeit um den Faktor 100 zu verbessern. Sie wird Ende 2016 den alten Bezugsrahmen LV03 auch in der Katastervermessung (amtlichen Vermessung) vollständig ablösen.

Das neue Landeshöhennetz LHN95 stützt sich weiterhin auf das Landesnivellement ab. Bei der vollständigen Neubearbeitung aller Landesnivellementmessungen seit 1903 werden zusätzlich die räumlichen Variationen des Erdschwerfelds mitberücksichtigt sowie die tektonischen Bewegungen der Messpunkte (Kinematik der obersten Erdkruste) modelliert und einer kinema-

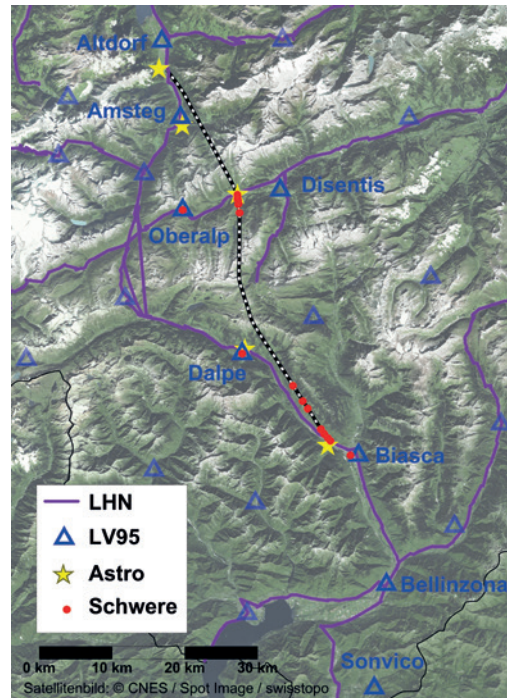


Abb. 1 | Netzpunkte LV95, Landeshöhennetz LHN (Stand 1996) mit zusätzlichen Lotabweichungs- und Schweremessungen für den GBT

tischen Ausgleichung unterzogen. Im Gegensatz zu den offiziell gültigen Gebrauchshöhen im amtlichen Höhenbezug des Landesnivellements (LN02) werden die Höhen im LHN95 potenzialtheoretisch streng als orthometrische Höhen über dem Geoid berechnet /Schlatter 2007/, /Schlatter & Marti 2007/.

Zur neuen Landesvermessung LV95 gehört daher auch ein neues Geoidmodell (CHGeo2004), welches wie das bisherige (CHGeo98) vor allem auf astrogeodätischen Lotabweichungsmessungen basiert, zusätzlich aber durch GPS-Messungen auf Punkten des Landeshöhennetzes und durch gravimetrische Daten gestützt wird. Die Genauigkeitssteigerung gegenüber den älteren Modellen ist insbesondere eine Folge der vielen zusätzlichen Messungen, aber auch der verbesserten Höhen- und Massenmodelle. Um die Konsistenz zwischen den ellipsoidischen Höhen im GPS-Landesnetz (LV95), den orthometrischen Höhen des LHN95 sowie den Geoidundulationen des neuen Geoidmodells zu gewährleisten, wurden deren Messungen und Daten im sog. „Swiss Combined Geodetic Network (CHCGN)“ gesamthaft kombiniert ausgeglichen /Marti 1997/.

3 KOORDINATION MIT DEM PROJEKT ALPTRANSIT

Von Anfang an hatte swisstopo mit LV95 das Ziel, neben den Anforderungen der amtlichen Vermessung in der Schweiz auch die Bedürfnisse großer Infrastrukturprojekte erfüllen zu können und entsprechende Synergien zu anforderungsreichen Ingenieurvermessungen zu schaffen /Schneider et al. 1996/. Dank der frühen praktischen Anwendungen der Satellitengeodäsie (GPS) in der Landesvermessung sowie der engen Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) und dem Institut

für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich im Rahmen von Forschungsprojekten der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) bekam swisstopo rasch eine führende Stellung bei GPS-Anwendungen in der Ingenieurvermessung. swisstopo verfügte zudem über langjährige Erfahrungen mit Triangulationsmessungen, mit überregionalen Präzisionsnivellements und Schwerefeldbestimmungen ebenso wie mit Deformationsmessungen (z. B. Stauwandüberwachungen) und damit über das notwendige Wissen, diese Messmethoden optimal zu kombinieren. Schon Ende der 1980er-Jahre war swisstopo an verschiedenen Grundlagenvermessungsaufgaben für große Ingenieurprojekte beteiligt, insbesondere an Tunnelprojekten für BAHN2000. Man konnte somit verschiedenste Erfahrungen aus der GPS-Landesvermessung und dem Landesnivellement in die AlpTransit-Projekte einfließen lassen.

Zur optimalen Koordination der Aufgaben der Grundlagenvermessung für AlpTransit mit der Landesvermessung und der amtlichen Vermessung wurde die Koordinationsgruppe „Vermessung AlpTransit“ gebildet, in welcher neben Vertretern der Bauherrschaft (Schweizerische Bundesbahnen SBB und Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn BLS) auch Experten der Vermessungsbehörden auf Bundesebene und der ETH Zürich Einsitz nahmen. Im Auftrag dieser Gruppe wurden sowohl vom IGP wie auch von swisstopo verschiedene Probleme im Rahmen des Vorprojekts bearbeitet. Diese Studien dienten dann als Grundlage für die öffentliche Ausschreibung der Vermessungsarbeiten.

4 HÖHEN-GRUNDLAGENNETZ

4.1 Das Landesnivellement als Basis

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts wurde mit der Projektierung eines neuen Basistunnels begonnen. Beinahe so lange befassten sich auch Spezialisten damit, ob und wie ein solches Projekt aus vermessungstechnischer Sicht realisiert werden kann. Im Abschlussbericht zum „Gerber-Netz“, dem ersten Grundlagennetz für einen im Jahr 1970 am Gotthard geplanten Basistunnel, wurde bezüglich der Höhe einzig festgehalten:

„Die beiden Portale und die drei Zwischenangriffschächte wurden in ihrer Höhe durch die Nivellemente der Eidgenössischen Landestopographie festgelegt. ... es wäre wohl müßig, an dieser Stelle von der hohen Genauigkeit der bereits legendär gewordenen und international anerkannten Arbeiten der traditionsbewussten Landestopographie auf diesem Gebiet weitere Worte zu verlieren“ /Gerber 1974/.

Tatsächlich stützten sich alle neuen AlpTransit-Basistunnel (Gotthard, Lötschberg, Ceneri) auf die zu Projektbeginn vorhandenen Messungen des Landesnivellements ab. Der nachfolgende Teil soll zeigen, dass für ein derart anforderungsreiches Projekt doch deutlich mehr Konzeptarbeit und Berechnungen notwendig waren, als das obige, ziemlich unbescheidene Lob vortäuscht.

Am Beispiel des GBT betrachtet, stammten die damals aktuellsten Verbindungsmessungen aus den Jahren 1970 bis 1973 (Abb. 1). Für den Durchschlag des 57 km langen Tunnels waren oberirdisch nur ca. 30 km zusätzliche Präzisionsnivellements

notwendig, welche 1996 gemessen wurden. Sie dienten dem Anschluss der Portale Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Polmengo (Faido) und Bodio (Biasca) an stabile Punkte des Landeshöhennetzes (LHN). Alle späteren Messungen im Umfang von mehreren hundert Kilometern wurden nachträglich für Setzungsüberwachungen und tektonische Untersuchungen angeordnet. Sie hatten auf die Durchschläge keinen direkten Einfluss mehr.

4.2 Höhen im Alpenraum und speziell am Beispiel GBT

Höhenbestimmung mittels Nivellement ist bekanntlich eine simple Methode; die Behandlung der potenzialtheoretisch strengen Höhen in der Geodäsie wird eher als komplizierte, akademische und leicht lästige Notwendigkeit betrachtet. Eine Messschleife „Passstraße–Vertikalschacht–Bahntunnel“ hat jedoch besondere Eigenschaften. Für die Fachleute laienhaft zusammengefasst: Entlang der Passstraße erhält man übliche Nivellementhöhen, die weder „Fisch noch Vogel“ sind, im Vertikalschacht (mittels Distanzmessung) orthometrische Höhendifferenzen und in Tunneln mit geringem Gefälle fast exakt dynamische Höhen. Für die Laien etwas komplizierter formuliert: Ohne Berücksichtigung des Schwerefelds verfehlen derartige Schleifen selbst bei fehlerfreien Messungen den Zusammenschluss bis im Dezimeterbereich. Wenig Spielraum also, um zusammen mit den unvermeidlichen zufälligen Messfehlern die geforderte Durchschlagsgenauigkeit von 5 cm (1σ) zu erreichen.

4.3 Schwerefeld und Geoid

Das Schwerefeld der Erde beeinflusst praktisch alle geodätischen Messungen und muss in einem großen Projekt wie dem GBT auf jeden Fall berücksichtigt werden: Von der Korrektur der mit GPS bestimmten ellipsoidischen Höhen um die Geoidundulationen bzw. der nivellierten Höhen um den Einfluss der Schwere über die Korrektur von terrestrischen Messungen (insbesondere Kreiselmessungen) um den Einfluss der Lotabweichung bis zur Netzorientierung mittels astronomischer Azimute.

Zu Beginn des Baus des GBT war das Geoidmodell CHGeo98 (Abb. 2) aktuell, welches sich im Wesentlichen auf Lotabweichungsmessungen, aber auch auf GPS/Nivellement-Daten stützt /Marti 1997/. Bei diesem Modell handelt es sich aber nicht nur um eine einfache Bezugsfläche für die Höhenbestimmung, sondern um ein wirkliches 3D-Modell, welches auch die Interpolation von Schwerewerten und Lotabweichungen an beliebigen Punkten innerhalb und außerhalb der Erdoberfläche erlaubt. Nebst den gemessenen Schwerefeldkomponenten wurden folgende Massenmodelle verwendet, welche ein vereinfachtes Dichtemodell der Erdkruste darstellen:

- Topographiemodell mit einer Einheitsdichte von $2,67 \text{ g/cm}^3$ der Massen zwischen Erdoberfläche und Meereshöhe;
- Dichtekontrast an der Krusten-Mantelgrenze (Moho-Modell);
- Modelle des Ivrea-Körpers und der Sedimente der Po-Ebenen, welche vor allem im Süden der Schweiz sehr große Anteile an den Lotabweichungen verursachen;

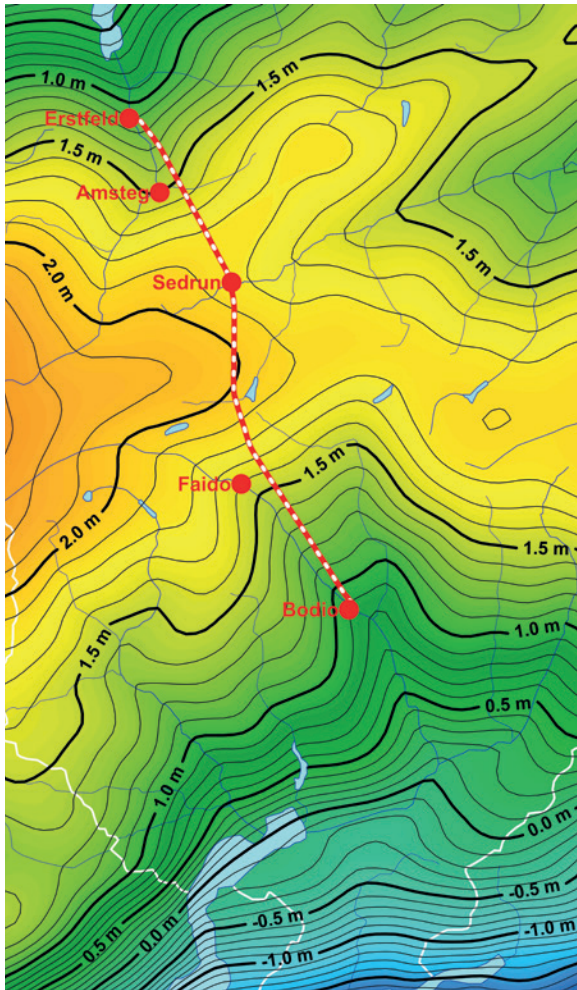


Abb. 2 | Geoidmodell CHGeo98 im Schweizerischen Bezugssystem mit Tunnelverlauf GBT

■ Modelle der Wassermassen der Seen, Eismassen der Gletscher und quartäre Füllungen einiger großer Täler, welche meist nur sehr lokal wirken.

Die verbleibenden, nicht erklärten Residuen werden durch einen Kollokationsansatz interpoliert.

2004 wurde das CHGeo98 durch das aktuellere Modell CHGeo2004 ersetzt, welches sich stärker auf GPS/Nivellement, aber auch weiterhin auf Lotabweichungsmessungen und zusätzlich auf Schweremessungen abstützt /Marti 2013/. Für den Bau des GBT wurde aber bis zum Abschluss das CHGeo98 verwendet.

4.4 LHN95: kinematische Ausgleichung und Geodynamik des Alpenkörpers

Die Idee, die Höhengrundlage auf der damals erst geplanten Neuauswertung des LHN zu basieren, beruhte auf einer Vereinbarung zwischen swisstopo und dem Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel VI-GTB /Schneider & Haag 1995/. Sie ist eng verbunden mit der Realisierung der neuen Landesvermessung LV95 und insbesondere dem neuen Landeshöhennetz LHN95. Dasselbe Konzept wurde auch beim Bau des 39 km langen Lötschberg-Basistunnels erfolgreich umgesetzt /Riesen et al. 2005/.

LHN95 basiert auf einem orthometrischen Höhensystem und wurde durch eine kinematische Neuausgleichung aller seit 1903 getätigten Messungen realisiert. Zusätzlich zur Reduktion der Schwerefeldinflüsse werden auch die tektonischen Bewegungen („Alpenhebung“ von bis zu 1,5 mm/Jahr) berücksichtigt. Abb. 3 zeigt einen aktuelleren Stand der vertikalen Hebungen und Senkungen aufgrund sämtlicher Messungen im Landesnivellement von 1903 bis 2012.

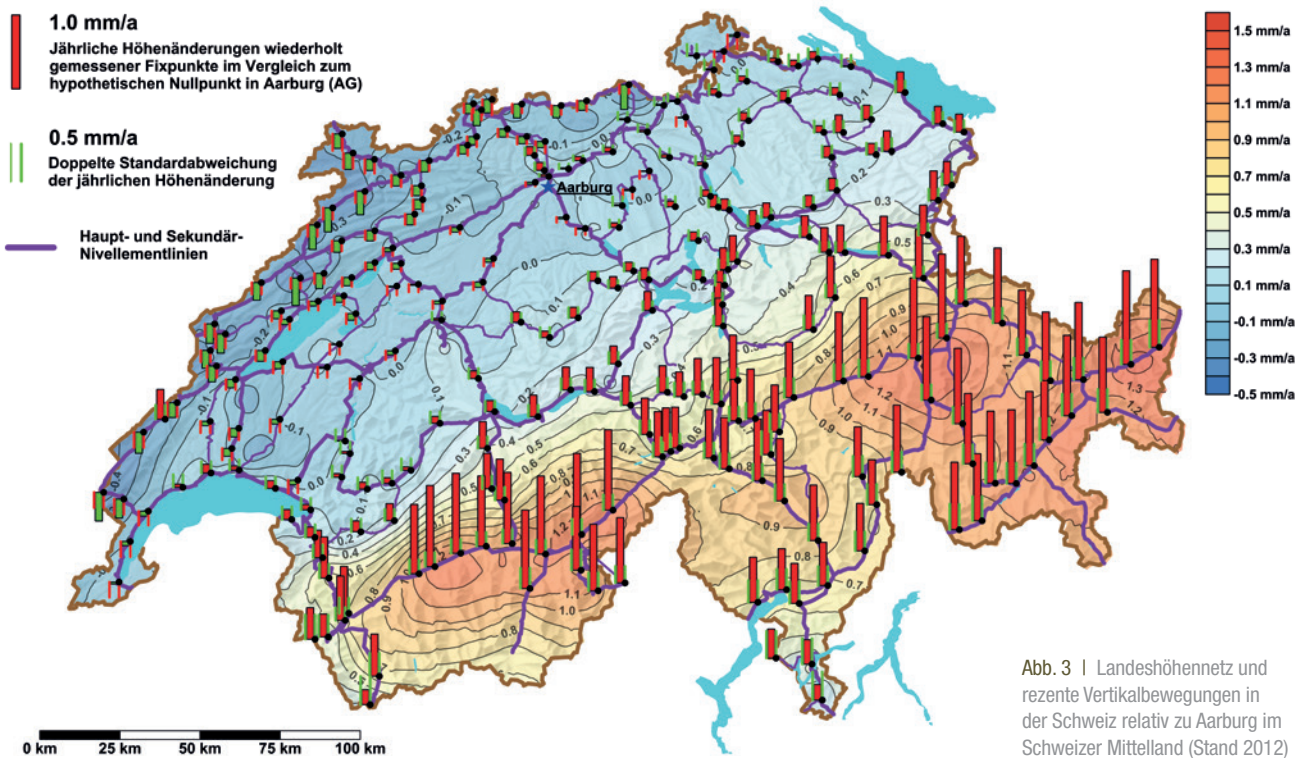


Abb. 3 | Landeshöhennetz und rezente Vertikalbewegungen in der Schweiz relativ zu Aarburg im Schweizer Mittelland (Stand 2012)

Folgende Vorteile waren nebst dem minimalen Aufwand an Neu-messungen für den Bau des GBT relevant:

- hohe Genauigkeit und verbesserte Zuverlässigkeit;
- strenge, dem lokalen Schwerefeld angepasste Höhen;
- minimierte Fehlereinflüsse bei der Verwendung von Messungen aus verschiedenen Zeiträumen;
- Kombinierbarkeit mit ellipsoidischen Höhen aus GPS-Netzen und dem Geoid der Schweiz CHGeo98.

Mithilfe der kinematischen Ausgleichung werden nach der Methode der kleinsten Quadrate aus den Potenzialdifferenzen aus unterschiedlichen Messperioden die geopotenziellen Koten C der Höhenfixpunkte zu einem bestimmten Referenzzeitpunkt sowie deren zeitlichen Änderungen als unbekannte Parameter geschätzt. Dem mathematischen Modell liegt eine lineare Funktion in Abhängigkeit der Zeit zugrunde. Für die Potenzialänderungen wird pro Punkt nur ein Parameter berechnet. Die Beobachtungsgleichungen des funktionalen Modells lauten:

$$\Delta C_{i,j}^k + e_{i,j}^k = C_j^0 - C_i^0 + (t^k - t^0)(V_j - V_i), \quad (1)$$

mit:

$\Delta C_{i,j}^k$ Potenzialdifferenz zwischen den Punkten i und j zur Messzeit t^k ,

$e_{i,j}^k$ Verbesserung der gemessenen Potenzialdifferenz,

C_i^0, C_j^0 unbekannte geopotenzielle Koten der Punkte i und j zur Referenzzeit t^0 ,

V_i, V_j unbekannte Vertikalgeschwindigkeiten der Punkte i und j ,

t^0 Referenzzeit, auf die sich die berechneten Koten beziehen,

t^k Zeitpunkt der betreffenden Messung.

Die Berechnung der orthometrischen Höhe entspricht einer einfachen Division der geopotenziellen Kote durch die mittlere Schwere entlang der Lotlinie.

Aus einer ersten, provisorischen Berechnung von LHN95 im Jahr 1999 (mit ca. 6800 km der total 12000 km Nivellement) wurden VI-GBT orthometrische Höhen und Vertikalgeschwindigkeiten der Portalpunkte abgeliefert. Die Standardabweichungen (1σ) gegenüber dem Portal Erstfeld betragen in Sedrun ± 9 mm und in Biasca ± 8 mm (Tab. 1). Diese Genauigkeitsmaße ergaben sich aus der Gesamtausgleichung der Messungen (Potenzialdifferenzen) zusammen mit dem Einfluss der mittleren Schwere in der Lotlinie, welcher jedoch nicht hypothesenfrei berechnet werden kann. Die Unsicherheit der mittleren Schwere wurde mithilfe einer Formel nach /Wirth 1990/ berücksichtigt:

$$s_H/mm = \sqrt{s_C^2 + \left(\frac{H/mm}{\bar{g}/mGal}\right)^2 (1,5^2 + (1,26 \cdot H/km)^2)}, \quad (2)$$

mit:

s_C Standardabweichung der geopotenziellen Kote,

H orthometrische Höhe,

\bar{g} mittlere Schwere längs der Lotlinie.

Weiterführende Angaben zur kinematischen Ausgleichung und zur Berechnung der mittleren Schwere finden sich in /Schlatter 2007/ und /Wirth 1990/.

4.5 Lagerung in den offiziellen Höhen LN02

Wieso die offiziellen Höhen (LN02) im Dezimeterbereich von den orthometrischen Höhen abweichen, wurde in /Schlatter & Marti 2005/ dargelegt. Zusammengefasst nochmals die drei wichtigsten Ursachen in LN02:

- keine Berücksichtigung des Schwerefeldinflusses (resp. unterschiedliche Höhenarten);
- präzise Messungen werden nach wie vor in Knotenpunkte eingezwängt, deren Höhen auf das „Nivellement de Précision“ aus den Jahren 1864 bis 1891 zurückgehen;
- dadurch auch keine Berücksichtigung der bekannten rezenten Höhenänderungen.

Die Projektleitung und VI-GBT entschieden sich trotzdem für den Verbleib in LN02, da die Projektierung und auch die Anschlussbauwerke bereits in diesem Rahmen vorlagen. Dass es auch umgekehrt geht, bewies die Realisierung des Lötschberg-Basistunnels, wo LHN95 als Werkshöhenrahmen verwendet wurde. Will man den Nachteilen und Mängeln von LN02 entgegenwirken, müssen an der vortriebsbegleitenden Höhenübertragung Korrekturen angebracht werden, nämlich:

- Einfluss des Schwerefelds im Tunnel (orthometrische Korrekturen resp. theoretischer Schleifenschluss);
- Einfluss des Unterschieds LHN95 – LN02 (Tab. 1 und Abb. 4);
- Einfluss der unterschiedlichen Hebungsraten (Tab. 1), welcher theoretisch in 10 bis 20 Jahren Bauzeit nur knapp 1 cm überschreitet.

Tab. 1 enthält die Differenzen zwischen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02 relativ zum Portal Erstfeld sowie die berechneten

Portal	Höhe in m ü. M.	Länge GBT in km	σ LHN95 in mm	LHN95 – LN02 in m	LNIV – LN02 in m	Hebung in mm/a
Erstfeld	460	0	± 0 (Ref.)	0 (Ref.)	0 (Ref.)	0,67
Amsteg	510	8	± 3	0,02	0,01	0,78
Sedrun	1410	21	± 9	0,13	0,01	0,80
Faido	760	40	± 7	0,11	0,05	1,25
Biasca	300	57	± 8	0,11	0,09	1,22

Tab. 1 | Genauigkeiten von LHN95, der Vergleich zwischen LHN95 und LN02, reinen Nivellementhöhen (LNIV) und LN02 relativ zum Portal Erstfeld sowie die Vertikalgeschwindigkeiten bezüglich des Referenzpunkts Aarburg

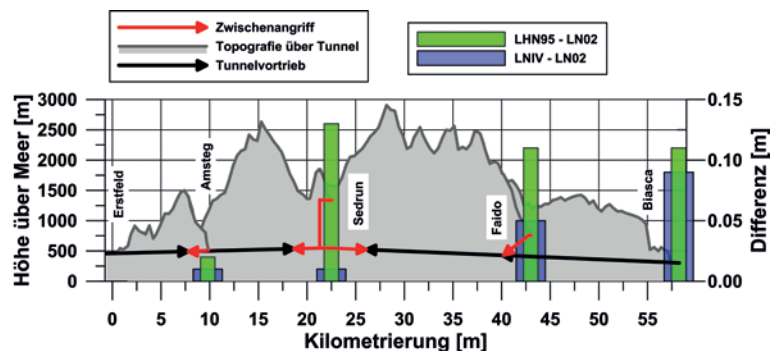


Abb. 4 | Querprofil durch den GBT mit Zwischenangriffen (rot) und den Differenzen LHN95 – LN02 und LNIV – LN02

Vertikalgeschwindigkeiten. Die Spalte „LNIV – LN02“ zeigt zudem die Differenz der Resultate einer kinematischen Ausgleichung reiner Nivellement-Höhendifferenzen und LN02. Zwischen Erstfeld und Sedrun sind diese fast identisch, zwischen Sedrun und Biasca summieren sich die Abweichungen bis auf 10 cm auf.

4.6 Orthometrische Korrekturen

Selbst wenn der Tunnel ausgehend von LHN95-Höhen abgesteckt worden wäre, hätten die Vortriebs-Nivellements um die Schwerefeldinflüsse korrigiert oder zumindest der zu erwartende Schleifenschluss berücksichtigt werden müssen.

Die orthometrischen Korrekturen E sind nun so definiert, dass sie zu der rohen nivellierten Höhendifferenz addiert die orthometrische Höhe ergeben. Sie setzen sich aus einem wegabhängigen Anteil E_1 und einem „Potenzial“-Anteil E_2 zusammen. Der aufsummierte wegabhängige Anteil E_1 über eine geschlossene Schleife entspricht dem sog. theoretischen Schleifenschluss. Es gilt:

$$E = E_1 + E_2, \tag{3}$$

$$E_1 = \frac{1}{g_0} \sum_A^B (g_i - g_0) dh_i^i, \tag{4}$$

$$E_2 = H_A \left(\frac{\bar{g}_A - g_0}{g_0} \right) - H_B \left(\frac{\bar{g}_B - g_0}{g_0} \right), \tag{5}$$

mit:

- g_i (gemessene) Schwere auf Punkthöhe längs des Messwegs,
- \bar{g}_A, \bar{g}_B mittlere Schwere in der Lotlinie von A und B,
- g_0 (beliebige) Konstante (im vorliegenden Fall $9,805 \text{ ms}^{-2}$),
- dh_i^i (nivellierte) Höhendifferenz entlang des Messwegs und
- H_A, H_B orthometrische Höhen der Punkte A und B.

Solange keine wesentlichen Änderungen vorgenommen werden, genügt es, sich auf die Projektkoordinaten und -höhen zu stützen, um quasi den Nivellementweg zu simulieren.

Aufgrund der vorhandenen Höhen- und Dichtemodelle, wie sie auch für die Geoidbestimmung verwendet wurden, prädierte swisstopo zuerst die Schwerewerte auf Punkthöhe sowie die mittleren Schwere entlang den Lotlinien und berechnete daraus die orthometrische Korrekturen. *Abb. 5* zeigt den Verlauf dieser „Korrekturen a priori“ entlang des gesamten Tunnels und über die Zwischenangriffe. Auffallend ist, dass der Vertikalschacht direkt keinen Einfluss hat. Die aus Distanzmessungen resultierende Vertikaldistanz entspricht quasi einer orthometrischen Höhendifferenz. Der maximale Fehler, welchen man sich bei einer Nichtberücksichtigung einhandeln würde, beträgt im Durchschlag Amsteg – Sedrun immerhin ca. 3,8 cm.

Anfänglich war nicht klar, ob die Qualität von CHGeo98 genügen würde, um die geforderten Toleranzen beim Bau und beim Durchschlag einzuhalten. Deshalb wurden einige zusätzliche Messungen und Studien durchgeführt. Eine der Studien /Marti 2002/ sollte die Frage beantworten, ob für den GBT ein gegenüber CHGeo98 verfeinertes Dichtemodell verwendet werden müsste, um die geforderte Genauigkeit für Lotabweichungen und orthometrische Korrekturen zu erreichen. Da sich CHGeo98 nur auf Oberflächenmessungen stützte und nur ein sehr rudimentäres Dichtemodell verwendet wurde, war es unsicher, ob dieses Modell beim Bau des Tunnels problemlos anwendbar sei. Deshalb wurde aus den vorhandenen geologischen Profilen ein lokales, dreidimensionales Dichtemodell gebildet und dessen Einfluss auf Lotabweichung, Schwere und orthometrische Korrektur berechnet. In der Schwere ergab die Verwendung des Dichtemodells Unterschiede bis maximal 6 mGal gegenüber CHGeo98. Dies hatte aber auf die orthometrischen Korrekturen nur maximale Einflüsse von etwa 2 mm. Für die Höhenkorrektur reichte folglich das Standardmodell mit einer einheitlichen Dichte vollständig aus.

Die Studie beantwortete jedoch noch nicht die Frage, ob im Tunnel Schweremessungen durchzuführen sind, oder ob die von

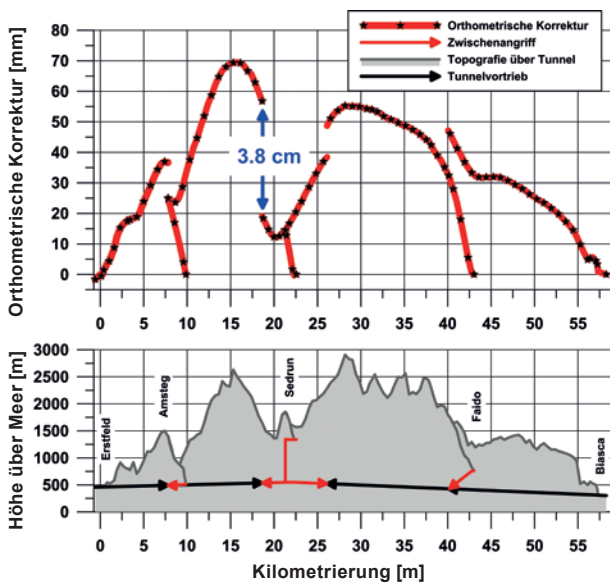


Abb. 5 | Orthometrische Korrekturen a priori entlang des Vortriebs am GBT

Datum	Tunnel/Vortrieb	Länge in km	Δ Höhe in cm
28.02.1880	Gotthard-Bahntunnel	15	7
24.05.1905	Simplontunnel	20	9
31.03.1911	Lötschbergtunnel	15	10
	<i>Lötschberg-Basistunnel:</i>	38	
28.04.2005	Mitholz-Ferden	21	0,4
	<i>Gotthard-Basistunnel:</i>	57	
22.08.2006	Faido – Bodio	20	1,7
14.10.2007	Amsteg – Sedrun	17	0,3
16.06.2009	Erstfeld – Amsteg	10	0,5
15.10.2010	Sedrun – Faido	23	1,1
21.01.2016	Ceneri-Basistunnel	15	1

Tab. 2 | Durchschlagsergebnisse in der Höhe an großen Schweizer Alpentunneln

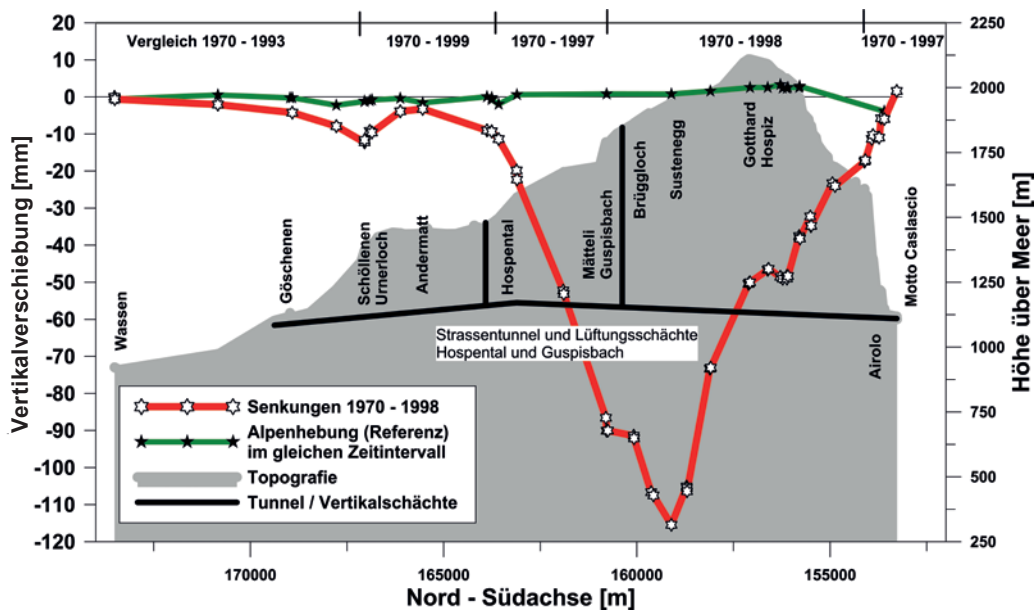


Abb. 6 | Senkungen am Gotthardpass aufgrund des Baus des Straßentunnels /Schlatter 2007/

der Erdoberfläche in die Tunnelröhre extrapolierten Werte für die Höhenkorrektur genügen würden. Im Jahr 2005 wurden deshalb an einigen wenigen Punkten in den Portalbereichen und im damals bereits zugänglichen Teil des Tunnels Schweremessungen durchgeführt und mit den aus CHGeo98 prädierten Werten verglichen. Dabei haben sich maximale Unterschiede von weniger als 3 mGal ergeben, was für die Berechnung der orthometrischen Korrektur ebenfalls vernachlässigbar ist und weswegen somit auf systematische Schweremessungen verzichtet werden konnte /Bürki et al. 2005/.

5 DER „DURCHSCHLAGENDE“ ERFOLG

Die Zusammenstellung in Tab. 2 zeigt die Höhendurchschlagsfehler an den einzelnen Tunnelabschnitten der AlpTransit-Tunnels und bestätigt den sehr schönen Erfolg aller beteiligten Vermesser und der gewählten Konzepte. Ergänzend sind die Ergebnisse einiger älteren Alpendurchstiche aufgeführt: aus /Stengele & Schätti 2010/ sowie /Riesen et al. 2005/.

6 WAS ÜBER DEN TUNNELN GESCHEHEN KANN

Bereits mit der Projektierung des GBT wusste jeder nur halbwegs geologisch Interessierte, dass das Gotthardmassiv nicht in letzter Konsequenz unverrückbar dasteht. Die in Abb. 3 dargestellten Höhenänderungen beispielsweise waren in ihren Grundzügen schon seit Anfang der 1970er-Jahre bekannt. Nebst großräumiger Tektonik waren vor Baubeginn auch lokale, jungquartäre Verwerfungen von Interesse, welche sich vermutlich bis auf das Tunnelniveau des Gotthard-Straßentunnels fortsetzen. Deshalb wurde 1997 von der Projektleitung angeregt, das Überwachungsnivellement im Gotthard-Straßentunnel nach seiner Eröffnung 1980 ein zweites Mal durchzuführen. Daraus sollen sich allfällige Konsequenzen für den Bau des Hochleistungs-Bahntunnels frühzeitig erkennen lassen.

Zwischen dem ausführenden Vermessungskonsortium (VI-GBT), der Projektleitung GBT, swisstopo und dem IGP-ETHZ entstanden interessante Diskussionen um die Idee, die „Potenzialtheorie“ anhand weiterer Messungen durch die senkrechten Lüftungsschächte Hospental (320 m), Guspisbach (530 m) und entlang der Passstraße zu testen und so auch Erkenntnisse für den geplanten Vertikalschacht Sedrun zu gewinnen /Geiger & Schlatter 2010/. Da das Passnivellement Gotthard schon mehr als 25 Jahre alt war, entschied man, den Abschnitt zwischen Hospental und Guspisbach auf einer Länge von 5 km und einer Höhendifferenz von 330 m neu zu nivellieren (Abb. 6). Ende September 1997 waren diese Messungen abgeschlossen, zeigten aber Abweichungen von 8 cm zum Passnivellement aus dem Jahr 1970. Welten für einen Nivelleur, aber die Diskrepanz blieb auch nach zahlreichen Kontrollmessungen bestehen und ließ sich nicht mehr wegdiskutieren, insbesondere als das Nivellement über den Pass 1998 vervollständigt wurde.

Das Ergebnis mit maximalen Senkungen des anstehenden Felsens von bis zu 12 cm war sehr überraschend (Abb. 6). Mit Rückblick auf den Fall Zeuzier /Biedermann 1980/, wo sich aufgrund der Entwässerung des porösen Felsens durch den Rawil-Sondierstollen die darüber liegende Staumauer unregelmäßig senkte, was zu massiven Schäden führte, lag eine plausible, von Teilen der Fachwelt nicht unbestrittene Erklärung bereit. Dennoch beschleunigte das Resultat am Gotthard die umfangreichen Mess- und Monitoring-Arbeiten rund um die vom geplanten Basistunnel unterquerten Talsperren Nalps, Curnera und Sontga Maria – zurecht, wie die neusten Erkenntnisse zeigen. Auch oberhalb des neuen Basistunnels ließen sich massive Senkungen in ähnlicher Größenordnung nachweisen, welche aber bis jetzt zu keinen Schäden führten /Studer & Ryf 2014/.

7 BEMERKUNGEN UND FAZIT

Im Rückblick betrachtet ist es bemerkenswert und das Verdienst der damaligen Verantwortlichen, mit nur 30 km Neumessungen

eine solide Höhenbasis für den Bau des GBT festzulegen. Als Ergänzung noch einige Bemerkungen:

- Grundsätzlich ist es egal, welcher Höhenrahmen beim Bau der alpenquerenden Bahntunnel verwendet wird. Dies haben die beiden Projekte Gotthard und Lötschberg bewiesen. Ohne die Kenntnisse des exakteren LHN95 und CHGeo98 wäre aber kein entsprechender Erfolg möglich gewesen.
- Viel wichtiger ist es, die unterschiedlichen Korrekturen, Vorteile und Nachteile richtig zu handhaben. Diese weitaus gefährlichere Hürde haben die Projektvermesser bei allen drei AlpTransit-Tunneln vorbildlich gemeistert.
- Der Einfluss der Alpenhebung auf die Höhengrundlage ist wohl interessant, aber für den Durchschlag von untergeordneter Bedeutung. Die Hebungsraten beruhen im Projektgebiet GBT meist auf dem Vergleich von zwei Messepochen (ca. 1920 und 1970). Die viel größeren Senkungen im Gotthardgebiet (*Abb. 6*) wurden 1997 von swisstopo eher zufällig entdeckt. Rückblickend betrachtet, bestand also das bedeutend größere Risiko, dass auch die Portalbereiche von solchen Einflüssen hätten betroffen sein können.
- Wer heute (oder gar vor 15 Jahren) behauptet, die GNSS-Messungen ersetzen die aufwendigen Nivellementmessungen vollständig, liegt nicht ganz richtig. Gerne wird vergessen, dass die ebenso notwendigen Geoidmodelle zurzeit nicht ohne die Informationen aus LHN95 realisierbar sind, wenn man eine ansprechende Genauigkeit erreichen will.

Das überwiegende Lob für die erfolgreichen Durchstiche gebührt zweifelsohne denjenigen Vermessern, welche unter den erschwerten und teilweise misslichen Bedingungen im Tunnel beharrlich ihr Ziel verfolgten. Ohne entsprechende Ausgangswerte an den Portalen wären ihre Anstrengungen aber infrage gestellt gewesen. Auch für die Verantwortlichen der Landesvermessung war AlpTransit eine große Herausforderung.

LITERATUR

Biedermann, R. (1980): Außerordentliches Verhalten der Staumauer Zeuzier. In: Wasser, Energie, Luft, 72(1980)7/8.

Bürki, B.; Ganz, M.; Hirt, Ch.; Marti, U.; Müller, A.; Radogna, P.V.; Schlatter, A.; Wiget, A. (2005): Astronomische und gravimetrische Zusatzmessungen für den Gotthard-Basistunnel. swisstopo Report 05-34. Bundesamt für Landestopografie, Wabern.

Geiger, A.; Schlatter, A. (2010): Von der Potenzialtheorie zu den Senkungen am Gotthardpass. In: Geomatik Schweiz, 108(2010)12, 628–629.

Gerber, P. (1974): Das Durchschlagsnetz zur Gotthard-Basislinie. Mitteilungen aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der EHTZ, 17.

Marti, U. (1997): Geoid der Schweiz 1997. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, 56. SGK 1997.

Marti, U. (2002): AlpTransit Gotthard Basistunnel: Schwerefeldstudie. Technischer Bericht 01-36. Bundesamt für Landestopografie, Wabern.

Marti, U. (2013): CHGeo2004. Geoidmodell der Schweiz 2004. Dokumentation der Berechnungen. swisstopo Report 04-54. Bundesamt für Landestopografie, Wabern.

Riesen, H.-U.; Schweizer, B.; Schlatter, A.; Wiget, A. (2005): Tunnelvermessung des BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnels. In: Geomatik Schweiz, 103(2005)11, 608–612.

Stengele, R.; Schätti, I. (2010): Grundlagen- und Hauptkontrollmessungen im Gotthard-Basistunnel. In: Geomatik Schweiz, 108(2010)12, 548–556.

Studer, M.; Ryf, A. (2014): Erkenntnisse aus dem geodätischen Langzeitmonitoring beim Bau des Gotthard-Basistunnels. In: Geomatik Schweiz, 112(2014)6, 256–259.

Schlatter, A. (2007): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 72. SGK 2007.

Schlatter, A.; Marti, U. (2005): Höhentransformation zwischen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02. In: Geomatik Schweiz, 103(2005)8, 450–453.

Schlatter, A.; Marti, U. (2007): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz ‚LV95‘. Teil 12: Landeshöhennetz ‚LHN95‘. swisstopo Doku Nr. 20. Bundesamt für Landestopografie, Wabern.

Schneider, D.; Haag, R. (1995): AlpTransit Gotthard Basistunnel: Höhengrundlagenetz auf der Basis des Landesnivellements. Technischer Bericht 95-22. Bundesamt für Landestopografie, Wabern.

Schneider, D.; Marti, U.; Wiget, A. (1996): Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95 als Grundlage für die Vermessung der neuen Eisenbahn-Alpentransverse ‚AlpTransit‘. In: Brandstätter/Brunner/Schelling (Hrsg.): Ingenieurvermessung 96. Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung. Band 1. Dümmler, Bonn, B3 1–13.

Signer, T. (2002): Landesvermessung LV95: Übersicht und Stand des Projektes. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (VPK) 100(2002)1, 4–7.

Wiget, A.; Marti, U.; Schlatter, A. (2010): Beiträge der Landesvermessung zum AlpTransit Gotthard-Basistunnel. In: Geomatik Schweiz, 108(2010)12, 575–581.

Wirth, B. (1990): Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrischen und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, 42. SGK 1990.

Dr. Andreas Schlatter

BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE
SWISSTOPO

Seftigenstrasse 264 | CH-3084 Wabern
andreas.schlatter@swisstopo.ch



Dr. Urs Marti

BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE
SWISSTOPO

Seftigenstrasse 264 | CH-3084 Wabern
urs.marti@swisstopo.ch



Dipl.-Ing. Adrian A. Wiget, pat. Ing.-Geometer

BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE
SWISSTOPO

Seftigenstrasse 264 | CH-3084 Wabern
adrian.wiget@swisstopo.ch



Manuskript eingereicht: 31.03.2016 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet