

Beiträge der Landesvermessung zum AlpTransit Gotthard-Basistunnel

Autor(en): **Wiget, Adrian / Marti, Urs / Schlatter, Andreas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatca Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **108 (2010)**

Heft 12: **AlpTransit**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-236727>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Beiträge der Landesvermessung zum AlpTransit Gotthard-Basistunnel

Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo hat in den 1990er Jahren die neue Landesvermessung der Schweiz LV95 konzipiert und als wichtigstes Element das GPS-Landesnetz realisiert. Als zusätzliche Komponenten des neuen Landesvermessungswerkes wurden das Landeshöhennetz LHN95 und ein neues Geoidmodell der Schweiz berechnet. Die neue Landesvermessung erfüllt dank ihrer landesweit homogenen Genauigkeit im Zentimeterbereich auch die Anforderungen der Grundlagenvermessungen für grosse Ingenieurprojekte wie den Gotthard- und den Lötschberg-Basistunnel.

Au cours des années 1990, l'Office fédéral de topographie swisstopo a conçu la nouvelle mensuration nationale MN95 en réalisant sa pièce maîtresse, soit le réseau national GPS. La nouvelle œuvre de la mensuration nationale a été complétée par le réseau altimétrique national RAN95 et par le calcul d'un nouveau modèle de géoïde de la Suisse. Par sa précision homogène de l'ordre du centimètre sur l'ensemble du territoire, la nouvelle mensuration nationale répond également aux exigences des mensurations de base pour les grands projets comme les tunnels de base du Gothard ou du Lötschberg.

L'Ufficio federale di topografia swisstopo ha concepito negli anni Novanta la nuova misurazione nazionale della Svizzera MN95, realizzando quale elemento principale la rete nazionale GPS. La nuova opera della misurazione nazionale è stata completata con il calcolo di una nuova rete nazionale altimetrica RAN95 e di un nuovo modello del geoido della Svizzera. Per la sua precisione omogenea nell'ordine del centimetro su tutto il territorio, la nuova misurazione nazionale risponde ugualmente alle esigenze delle misurazioni di base per i grandi progetti quali i tunnel del San Gottardo e del Lötschberg.

A. Wiget, U. Marti, A. Schlatter

Das Landesvermessungswerk 1995

Die geodätische Landesvermessung ist eine der Hauptaufgaben des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo. Sie umfasst die Erstellung, Weiterentwicklung und Erhaltung der geodätischen Grundlagen, namentlich der terrestrischen Bezugssysteme und deren Realisierung durch sog. 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 Ge-

nauigkeit und Verwendbarkeit stark zu verbessern. swisstopo hat die Landesvermessung im Rahmen des Projektes Landesvermessung 1995 (LV95) erneuert [Signer 2002]. Die wichtigsten Komponenten des sog. Landesvermessungswerkes 1995 sind: 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 Landeschwerenetz 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, welcher praktisch die Landestriangulation LV03 (1. bis 3. Ordnung) ersetzt. Aus Vergleichsmessungen konnten (gebietsweise systematische) Verzerrungen in der hundertjährigen LV03 bis zu 1.5 m nachgewiesen werden. Demgegenüber ist die landesweite Genauigkeit (1 Sigma) der Lagekoordinaten des Bezugsrahmens LV95 besser als 1 cm. Die neue Landesvermessung vermochte somit die Lagegenauigkeit um den Faktor 100 zu verbessern.

Das neue Landeshöhennetz LHN95 stützt sich zwar weiterhin auf das Landesnivellement (LN) ab. Bei der vollständigen Neubearbeitung aller LN-Daten seit 1903 werden aber auch die räumlichen Variationen des Erdschwerefeldes bzw. der Äquipotenzialflächen (Geoidmodell) berücksichtigt. Zudem werden die tektonischen Bewegungen der Messpunkte (Kinematik der obersten Erdkruste) modelliert und die LN-Messungen einer kinematischen 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 und ausgeglichen.

Zum neuen Landesvermessungswerk gehört daher auch ein neues Geoidmodell (CHGeo2004), welches wie das bisherige vor allem auf astrogeodätischen Lotabweichungsmessungen basiert, zusätzlich aber durch GPS-Messungen auf Punkten des Landeshöhennetzes und durch gravimetrische Daten gestützt wird. Die Genauigkeitssteigerung 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 Geoidmodelles zu gewährleisten, wurden deren Messungen und Daten im sog. «Swiss Combined Geodetic Network (CHCGN)» gesamthaft kombiniert ausgeglichen.

Vorprojekt Gotthard-Basistunnel

Von Anfang an hatte das Bundesamt für Landestopografie mit LV95 das Ziel, neben den Anforderungen der amtlichen Vermessung in der Schweiz auch die Bedürfnisse grosser Ingenieurprojekte erfüllen zu können und entsprechende Synergien zu anforderungsreichen Ingenieurvermessungen zu schaffen [Schneider et al. 1996]. Dank den 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 Erfahrung mit Triangulationsmessungen, mit überregionalen Präzisionsnivelements und Schwerefeldbestimmungen ebenso wie mit Deformationsmessungen 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 Tunnelvermessungen der BAHN2000.

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 (SBB und BLS) auch Experten der Vermessungsbehörden auf Bundesebene und der ETHZ Einsitz nahmen. Im Auftrag dieser Gruppe wurden sowohl vom IGP wie auch von swisstopo verschiedene Probleme im Rahmen des Vorprojektes bearbeitet. Diese Studien dienten dann als Grundlage für die öffentliche Ausschreibung der Vermessungsarbeiten.

Im Zusammenhang mit den hohen Genauigkeitsanforderungen für grosse Tun-

nel-Durchschlagsnetze sind besonders im alpinen Raum geodätische Besonderheiten wie die räumliche Variation des Schwerefeldes, die Kinematik der obersten Erdkruste sowie die Einflüsse der Refraktion auf die GPS-Messungen zu berücksichtigen. swisstopo konnte verschiedenste Erfahrungen aus der GPS-Landesvermessung und dem Landesnivellement in das Projekt Gotthard-Basistunnel (GBT) einfließen lassen. Hinzu kamen Erkenntnisse, welche nicht in einem direkten Zusammenhang mit dem Durchschlag stehen, aber dennoch im Gesamtprojekt berücksichtigt wurden (z.B. die im Landesnivellement gemessenen Setzungen über dem Gotthard-Strassentunnel (vgl. Abb. 6), welche zu einem Konzept für die Überwachung der Staumauern über dem GBT während dem Vortrieb führten).

Lage-Bezugsrahmen

Noch Mitte der 1970er Jahre wurde für die oberirdische Grundlagenvermessung des GBT ein kombiniertes Triangulationsnetz mit Richtungs- und Distanzmessungen vorgeschlagen [Gerber 1974]. Zwanzig Jahre später war ein hochpräzises GPS-Grundlagennetz in Kombination mit konventionell gemessenen Portalnetzen (Richtungen, Distanzen, Höhenwinkel) unbestritten. Die Portalnetze, in denen zusätzlich hochgenaue astronomische Azimute und Lotrichtungsmessungen durchgeführt wurden, dienten dazu, die Lagerung, den Massstab und die Orientierung des oberirdischen Grundlagennetzes mit möglichst kleinem Genauigkeitsverlust in den Berg zu übertragen.

GPS-Grundlagennetz

Mit dem GPS-Landesnetz LV95 hatte swisstopo Mitte der 1990er Jahre einen modernen geodätischen Bezugsrahmen höchster Präzision bereitgestellt (siehe oben), der auch den genauen Bezug zu globalen Referenzsystemen ermöglichte, wie sie in der Satellitengeodäsie verwendet wurden. Durch die gemessenen Beziehungen zur Landestriangulation 1./2. Ordnung und zum Landesnivellement

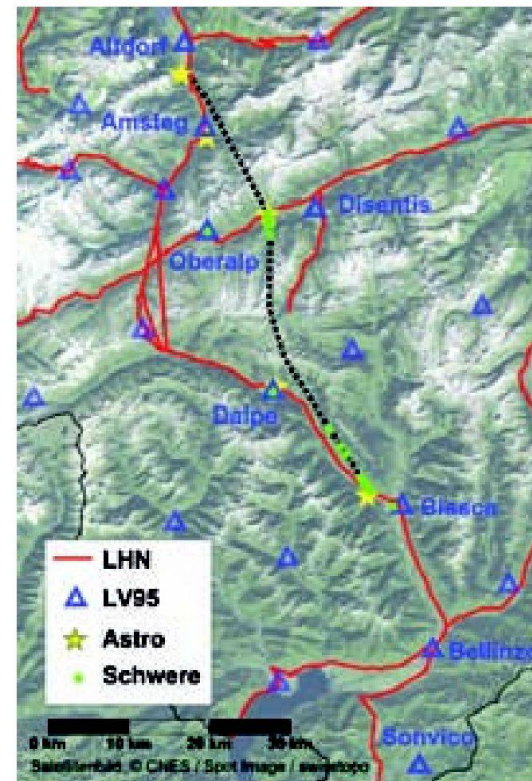


Abb. 1: Netzteil LV95 mit Landesnivellement (LHN), Schwere- und Astro-Punkten der Grundlagenvermessung Gotthard-Basistunnel.

liessen sich die Verzerrungen in den bestehenden Vermessungsgrundlagen erkennen. Abgestimmt auf das Konzept und die Messung des Grundlagennetzes für den GBT und den südlich anschliessenden Abschnitt «Gotthard Süd» (Bodio – Lugano) wurden von swisstopo 1995 zusätzliche LV95-Punkte erstellt und gemessen. Damit standen für das Grundlagennetz AlpTransit insgesamt acht LV95-Punkte zur Verfügung: Altdorf, Amsteg, Oberalp, Disentis, Dalpe, Biasca, Bellinzona und Sonvico (vgl. Abb. 1 und Abb. 2). Die ersten sechs wurden für den GBT verwendet, die letzten drei im Abschnitt «Süd».

Das Konzept des Grundlagennetzes sah vor, dass über diese Referenzpunkte der Bezug zur neuen Landesvermessung LV95 hergestellt wurde. Andererseits wurden in jedem Portal und bei jedem Zwischenanriff lokale Triangulationspunkte mitgemessen, welche den Bezug zur Landesvermessung LV03 und zur amtlichen Ver-



Abb. 2: LV95-Station Biasca.

messung ermöglichen. Im Mai 1996 fällt die Koordinationsgruppe «Vermessung AlpTransit» (unter Vorbehalt weiterer Abklärungen) den Vorentscheid, die Vermessungen für AlpTransit grundsätzlich im Bezugsrahmen LV95 durchzuführen. In enger Zusammenarbeit mit den SBB und dem Kanton Uri und kombiniert mit dem AV93-Projekt RAV Subito führte swisstopo 1996 in der Reussebene von Altdorf bis Amsteg Tests für den Übergang raumbezogener Daten von LV03 auf LV95 und die optimale Dreiecksvermaschung zur Transformationsmethode FINELTRA durch.

Die GPS-Messungen für die Abschnitte «Gotthard-Basistunnel» und «Gotthard Süd» wurden vom Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel (VI-GBT) bzw. dem Consorzio Geodetico Sud (COGESUD) je an zwei Tagen im November 1995 bzw. im Januar 1996 durchgeführt. Während der ganzen Messdauer des Grundlangennetzes GBT wurden LV95-Punkte permanent besetzt, um das Netz optimal zu lagern. Ein Vergleich mit den Koordinaten des GPS-Landesnetzes LV95 zeigte maximale Differenzen (Restklaffungen einer Helmert-Transformation) von 5 mm auf [Haag et al. 1996]. Anlässlich einer Wiederholungsmessung im Jahr 2005 lagen die Differenzen ebenfalls im Bereich von 2–6 mm [Schätti und Ryf 2007]. Die LV95-Punkte trugen aber nicht nur zur Genauigkeitssteigerung des Grundlagen-

netzes bei, sondern leisteten durch die zusätzliche Kontrolle auch einen Beitrag an die Erhöhung der Zuverlässigkeit, einer wichtigen Komponente der Tunnelabsteckung.

Lagerung in LV03

Als Resultat der kombinierten Ausgleichungen der GPS-Messungen und der konventionellen Messungen stand ein Koordinatensatz mit einer sehr hohen inneren Genauigkeit (cm) zur Verfügung. Diesen galt es in einem wohl definierten Bezugsrahmen zu lagern. Auf Antrag der beiden Vermessungskonsortien und gestützt auf eine Neubeurteilung durch die Koordinationsgruppe «Vermessung AlpTransit» fasste die Projektleitung AlpTransit 1997 den definitiven Beschluss, die Vermessung des GBT in einem Werknetz (NetzGBT Lage) durchzuführen. Das NetzGBT mit 31 Punkten und das Netz für den Abschnitt Gotthard-Süd mit 21 Punkten machten sich zwar die hohe Genauigkeit des LV95 zu Nutzen, wurden aber durch Transformationen im Bezugsrahmen der Landesvermessung LV03 gelagert, um die Klaffungen der Lagekoordinaten in den Anschlussbereichen der Portale und Zwischenangriffe möglichst klein zu halten. Die Verzerrungen in LV03 zwischen Altdorf und Lugano erforderten allerdings zwei unterschiedliche Transformationen für den GBT bzw. für den Abschnitt Gotthard-Süd, welche sich

hauptsächlich in einer Massstabsdifferenz von 10 ppm unterschieden. Die Gründe für diese Rahmenwahl und damit die Abkehr vom vermessungstechnischen Idealfall der (von swisstopo vorgeschlagenen) unverzerrten Lagerung in LV95 waren:

- Die Planungsarbeiten für AlpTransit erfolgten in LV03.
- Die Bahnvermessung der bestehenden SBB-Linien (DfA, Bahnanlagen und Gleisgeometrien) waren in LV03 vorhanden.
- Die Katastervermessung der betroffenen Gemeinden lagen in LV03 vor; Entscheide der amtlichen Vermessung für die Umstellung auf LV95 waren ausstehend.
- Für die Umstellung auf LV95 wurde mit massiven Zusatzkosten gerechnet.
- Die Zusammenarbeit mit externen Partnern würde durch die Umstellung auf LV95 zusätzlich erschwert (Missverständnisse durch Parallelität von LV95 und LV03).

An dieser Stelle sei erwähnt, dass für die Absteckung des BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnels eine andere Wahl des Lage-Bezugsrahmens getroffen wurde: Der Lötschberg-Basistunnel wurde vollständig im neuen Bezugsrahmen der Landesvermessung LV95 abgesteckt [Riesen et al. 2005]. Die beiden Lösungen zeigen, dass bei konsequenter Umsetzung der Rahmenwahl beide Varianten erfolgreich umgesetzt werden konnten.

Schwerefeld

Das Schwerfeld der Erde beeinflusst praktisch alle geodätischen Messungen und muss in einem grossen Projekt wie dem GBT auf jeden Fall berücksichtigt werden. Dies reicht von der Korrektur der mit GPS bestimmten ellipsoidischen Höhen um die Geoidhöhe, über die Netzorientierung mittels astronomischer Azimute, der Korrektur von terrestrischen Messungen (insbesondere Kreiselmessungen) um den Einfluss der Lotabweichung bis zur Korrektur der nivellierten Höhen um den Einfluss der Schwere (orthometrische Korrektur; siehe nächstes Kapitel).

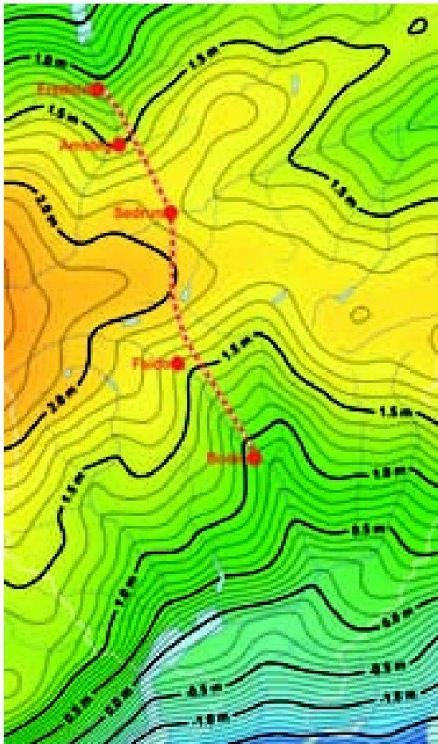


Abb. 3: Geoidmodell CHGeo98.

Zu Beginn des Baus des GBT war das Geoidmodell CHGeo98 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. 2004 wurde CHGeo98 durch ein aktuelleres Modell CHGeo2004 ersetzt, welches sich stärker auf GPS/Nivellement aber auch weiterhin auf Lotabweichungsmessungen und zusätzlich auf Schweremessungen abstützt. Für den Bau des GBT wurde aber bis zum Abschluss CHGeo98 verwendet (vgl. Abb. 3).

Anfänglich war noch 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 ver-

wendet werden müsste, um die geforderte Genauigkeit für Lotabweichungen und orthometrische Korrektur 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. Gegenüber dem Standardmodell von CHGeo98 ergaben sich Unterschiede in den Lotabweichungskomponenten von bis zu 0.5 mgon, welche vor allem an den geologischen Schichtgrenzen mit grossen Dichtekontrasten auftreten. Dieser Betrag liegt an der Grenze zur Signifikanz für die Korrektur von Kreiselmessungen und es wurde gefolgert, dass das Standardmodell verwendet werden kann und die Kreiselmessungen wenn möglich nicht direkt an geologischen Übergängen durchzuführen sind. In der Schwere ergab die Verwendung des Dichtemodells Unterschiede von bis ca. 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 ebenfalls vollständig aus. Mit dieser Studie wurde somit festgestellt, dass die Massenmodelle von CHGeo98 für den Bau des GBT genügen und keine weiteren, verfeinerten Dichtemodelle nötig waren. Die Studie beantwortete jedoch noch nicht die Frage, ob im Tunnel Schweremessungen durchzuführen sind, oder ob die von der Erdoberfläche in die Tunnelröhre extrapolierten Werte für die Höhenkorrektur genügen würden.

Um dies abzuklären, wurden 2005 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik der Universität Lausanne an einigen wenigen Punkten in den Portalbereichen und im damals bereits zugänglichen Teil des Tunnels Schweremessungen durchgeführt und mit den aus CHGeo98 interpolierten Werten verglichen (vgl.



Abb. 4: Schweremessung im Tunnel.

Abb. 1 und Abb. 4). Dabei haben sich maximale Unterschiede von weniger als 3 mgal ergeben, was für die Berechnung der orthometrischen Korrektur vernachlässigbar ist. Es wurde also festgelegt, dass keine systematische gravimetrische Vermessung des GBT nötig sein würde und dass CHGeo98 genügend genaue interpolierte Schwerewerte liefert. Diese Untersuchungen sind im swisstopo-Report 05-34 [Bürki et al. 2005] dokumentiert.

Ähnlich wie für die Schweremessungen musste auch für die Lotabweichungen und astronomischen Azimute verifiziert werden, dass die aus CHGeo98 berechneten Werte genügen, oder ob zusätzliche Messungen nötig waren. Dazu wurden im Sommer 2005 von der ETH Zürich und der TU Hannover in den Portalbereichen und in der Umgebung der weiteren Zugangsstollen astrogeodätische Messungen durchgeführt. Diese Messungen und deren Interpretation sind in einem separaten Beitrag [Bürki und Guillaume] im vorliegenden Heft beschrieben. Das Hauptresultat war aber auch in dieser Untersuchung, dass die aus CHGeo98 interpolierten Werte für den Bau des GBT durchaus ausreichen und keine weiteren Messungen nötig sein würden.

Die verschiedenen Untersuchungen über das Schwerfeld haben also gezeigt, dass bereits das Geoidmodell CHGeo98 der Schweizerischen Landesvermessung auch für Grossprojekte wie den GBT genügend gute Resultate liefert und keine teuren Zusatzmessungen nötig waren. Das Nach-

folgemodell CHGeo2004 brachte dann noch einmal eine Verbesserung insbesondere bei der Konsistenz in der Höhenbestimmung mit GPS und Nivellement.

Höhen-Grundlagennetz

Landesnivellement als Hauptbestandteil

Im Abschlussbericht zum «Gerber-Netz», dem ersten Grundlagennetz eines 1970 am Gotthard geplanten Basistunnels wird 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].*

Grundsätzlich gilt die erste Aussage auch für den durchgeschlagenen Basistunnel. Der nachfolgende Teil soll zeigen, dass für ein derart anforderungsreiches Projekt mehr Konzepte, Messungen und Berechnungen als unbescheidenes Lob notwendig waren.

Tatsächlich beruht das Höhengrundlagennetz des GBT auf den Messungen des Landesnivellements (wesentlich sogar auf den in [Gerber 1974] angedeuteten Linien aus den Jahren 1970–1973) sowie auf der Berechnung des neuen Landeshöhennetzes LHN95 (vgl. Abb. 1). Für den Durchschlag des 57 km langen Tunnels waren oberirdisch nur ca. 30 km zusätzliche Präzisionsnivellements notwendig. 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 km wurden für Setzungsüberwachungen, Ergänzungen der Portalnetze und tektonische Untersuchungen angeordnet (vgl. Beiträge in diesem Band). Sie hatten auf die Durchschläge keinen direkten Einfluss.

Höhen im Alpenraum

Höhenbestimmung mittels Nivellement ist bekanntlich eine simple Methode, die Behandlung der Höhen in der Geodäsie wird eher als komplizierte akademische (und lästige) Notwendigkeit betrachtet. Eine Messschleife «Passstrasse – Vertikalschacht – Bahntunnel» hat jedoch besondere Eigenschaften. Für die Fachleute zusammengefasst: Entlang der Passstrasse erhält man übliche Nivellementhöhen, die weder Fisch noch Vogel sind, im Vertikalschacht orthometrische Höhen und in Tunnels mit geringem Gefälle fast exakt dynamische Höhen. Für die Laien am Beispiel des GBT: Ohne Berücksichtigung des Schwerefeldes schliessen selbst fehlerfreie Messungen nur im Dezimeterbereich. Wenig Spielraum also, um zusammen mit den unvermeidlichen zufälligen Messfehlern die geforderte Durchschlagstoleranz von 12.5 cm (2.5σ) zu erreichen.

LHN95 als Basis

Die Idee, die Höhengrundlage auf der damals erst geplanten Neuauswertung des LHN zu basieren, beruhte auf einer Vereinbarung zwischen swisstopo und VI-GBT [Schneider und Haag 1995]. Sie ist eng verbunden mit der Realisierung der neuen Landesvermessung LV95 und insbesondere dem neuen Landeshöhennetz LHN95 [Schlatter und Marti 2007]. Dasselbe Konzept wurde auch für den Bau des Lötschberg-Basistunnels erfolgreich umgesetzt [Riesen et al. 2005].

LHN95 basiert auf einem orthometrischen Höhensystem und wurde durch eine ki-

nematische Neuausgleichung aller seit 1903 getätigten Messungen realisiert. Zusätzlich zur Reduktion der Schwerefeld-einflüsse werden auch die tektonischen Bewegungen («Alpenhebung» von bis zu 1.5 mm/Jahr) berücksichtigt.

Folgende Vorteile waren nebst dem minimalen Aufwand an Neumessungen für den Bau des GBT relevant:

- hohe Genauigkeit und verbesserte Zuverlässigkeit
- keine Fehlereinflüsse bei den Durchschlägen infolge des Schwerefeldes
- keine Fehlereinflüsse bei der Verwendung von Messungen aus verschiedenen Zeiträumen
- kombinierbarkeit mit ellipsoidischen Höhen aus GPS-Netzen und dem Geoid der Schweiz CHGeo98.

Aus einer ersten, prov. Berechnung von LHN95 im Jahre 1999 (mit ca. 6800 km der Total 12 000 km Nivellement) wurden VI-GBT orthometrische Höhen und Vertikalgeschwindigkeiten der Portalpunkte abgeliefert. Die relativen mittleren Fehler (1σ) gegenüber dem Portal Erstfeld betragen in Sedrun ± 9 mm und in Biasca ± 8 mm (vgl. Tab. 1). Diese Genauigkeitsmasse ergeben sich aus der Gesamtausgleichung der Messungen (Potenzialdifferenzen) zusammen mit dem Einfluss der mittleren Schwere, welcher nicht hypothesenfrei berechnet werden kann.

Tabelle 1 enthält die Differenzen zwischen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02 relativ zum Portal Erstfeld sowie die berechneten Vertikalgeschwindigkeiten. Die Kolonne «LNIV–LN02» zeigt zudem die Differenz der Resultate einer kinema-

Portal	Höhe	Länge GBT	m. F. LHN95	LHN95 - LN02	LNIV - LN02	Hebung
	[m ü. M.]	[km]	[mm; 1σ]	[m]	[m]	[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: Die Genauigkeit von LHN95, der Vergleich zwischen LHN95, reinen Nivellementhöhen (LNIV) und LN02 relativ zum Portal Erstfeld sowie die Vertikalgeschwindigkeiten bez. dem Referenzpunkt Aarburg.

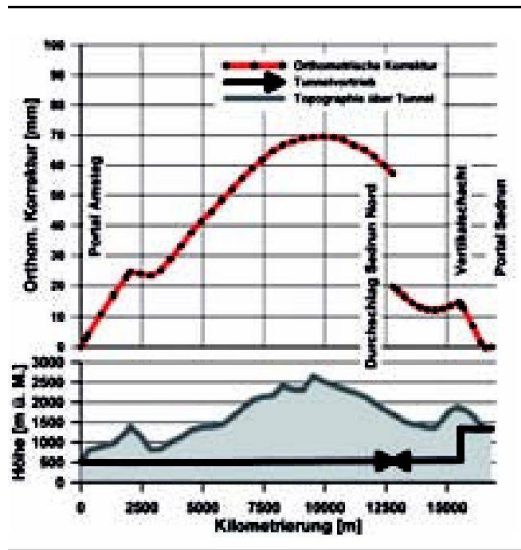


Abb. 5: Orthometrische Korrekturen a priori im Tunnel ausgehend von orthometrischen Höhen in den Portalen.

tischen Ausgleichung von reinen Nivellament-Höhendifferenzen zu LN02.

LN02 als Projekthöhenrahmen

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

- keine Berücksichtigung des Schwerefeldes (resp. unterschiedliche Höhenarten)
- präzise Messungen werden nach wie vor in Knotenpunkte eingezwängt, deren Höhen auf das «Nivellement de Précision» aus den Jahren 1864–91 zurück gehen
- 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 [Haag und Stengele 1999]. 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 ent-

gegen wirken, müssen an der vortriebsbegleitenden Höhenübertragung Korrekturen angebracht werden, nämlich:

- Einfluss des Schwerefeldes im Tunnel (orthometrische Korrekturen resp. theoretischer Schleifschluss)
- Einfluss des Unterschiedes LHN95 / LN02 (vgl. Tab. 1)
- Einfluss der unterschiedlichen Hebungsraten (vgl. Tab. 1), welcher theoretisch in 10–20 Jahren Bauzeit nur knapp 1 cm überschreitet.

Orthometrische Korrekturen

Selbst wenn der Tunnel ausgehend von LHN95-Höhen abgesteckt worden wäre, hätten die Vortriebs-Nivellemente um die Schwerefeldinflüsse korrigiert oder zumindest der zu erwartende Schleifschluss berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der vorhandenen Höhen- und Dichtemodelle, wie sie auch für die Geoidbestimmung verwendet wurden, berechnete swisstopo anhand der Projektkoordinaten für VI-GBT orthometrische Korrekturen a priori. Abb. 5 zeigt den Verlauf am Beispiel des Durchschlags Amsteg–Sedrun Nord. Auffallend ist, dass der Vertikalschacht direkt keinen Einfluss hat; die Vertikaldistanz entspricht quasi einer orthometrischen Höhendifferenz. Der Fehler im Durchschlag, welchen man sich

bei einer Nichtberücksichtigung einhandeln würde, beträgt immerhin ca. 3.8 cm.

Bemerkungen und Fazit

Im Rückblick ist es bemerkenswert und das Verdienst der damaligen Verantwortlichen, mit nur 30 km Neumessungen eine solide Höhenbasis für den Bau des AT-GBT festzulegen. Als Ergänzung noch einige Bemerkungen:

- Grundsätzlich ist es egal, welcher Höhenrahmen beim Bau der alpenquerenden Bahntunnels verwendet wird. Dies haben die beiden Projekte Gotthard und Lötschberg bewiesen. Ohne die Kenntnisse des exakteren LHN95 wäre aber kein entsprechender Erfolg möglich gewesen.
- Viel wichtiger ist es, die unterschiedlichen Korrekturen, Vorteile und Nachteile richtig zu handhaben. Diese weit aus gefährlichere Hürde haben beide Projektvermesser vorbildlich gemeistert.
- Nicht immer sind es die neusten Sensoren, welche uns mit noch besseren Resultaten beglücken (vgl. [Riesen et al. 2005]). Manchmal genügen auch über 30 Jahre alte Messungen.
- Der Einfluss der Alpenhebung auf die Höhengrundlage ist wohl interessant aber für den Durchschlag von unterge-

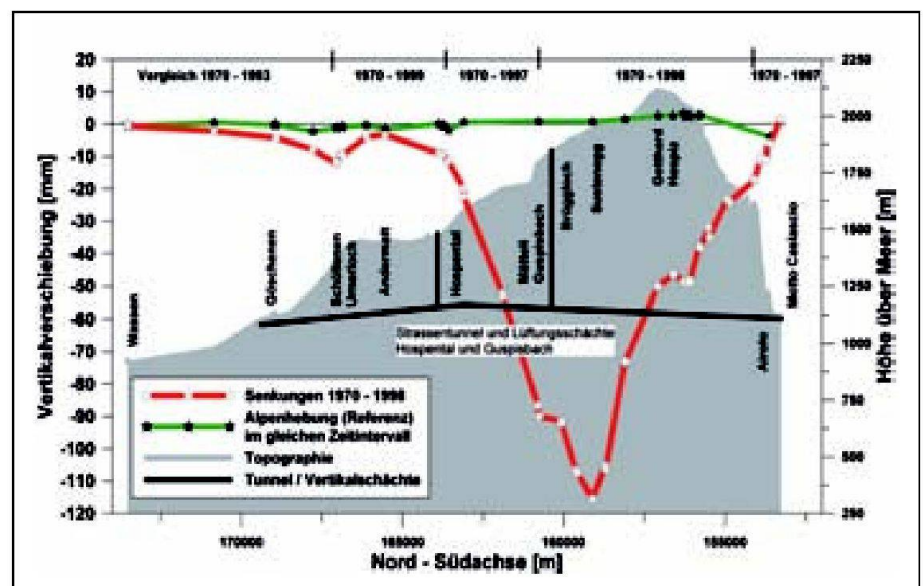


Abb. 6: Senkungen am Gotthardpass aufgrund des Baus des Strassentunnels [Schlatter 2007].

ordneter Bedeutung. Die Hebungsdaten beruhen im Projektgebiet GBT meist auf dem Vergleich von zwei Messepochen (ca. 1920/1970). Die viel grösseren Senkungen im Gotthardgebiet (vgl. Abb. 6 und [Geiger und Schlatter in diesem Heft]) wurden 1997 von swisstopo eher zufällig entdeckt. Rückblickend betrachtet bestand also das Risiko, dass auch die Portalbereiche von unbekanntem Einflüssen betroffen hätten sein können.

- Wer heute (oder gar vor 15 Jahren) behauptet, die GNSS-Messungen ersetzen die aufwändigen Nivellementmessungen vollständig, liegt nicht richtig. Gerne wird vergessen, dass die ebenso notwendigen Geoidmodelle z. Z. nicht ohne die Informationen aus LHN95 realisierbar sind, wenn man eine ansprechende Genauigkeit erreichen will. Von Unabhängigkeit also keine Spur.

Das grosse Lob für die erfolgreichen Durchschläge gehört 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 in Frage gestellt gewesen. Auch für die Verantwortlichen der Landesvermessung war AlpTransit eine grosse Herausforderung.

Literatur:

Bürki B., M. Ganz, Ch. Hirt, U. Marti, A. Müller, P.V. Radogna, A. Schlatter, A. Wiget (2005): Astrogeodätische und gravimetrische Zusatz-

messungen für den Gotthard-Basistunnel. swisstopo-Report 05–34.

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

Haag R., A. Ryf und R. Stengele (1996): Grundlagennetze für extrem lange Tunnel am Beispiel des Gotthard-Basistunnels. Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Haag R. und R. Stengele (1999): Vermessungstechnische Grundlagen und Herausforderungen beim Projekt «AlpTransit Gotthard Basistunnel». VDI Berichte 1454, VDI-Gesellschaft Bautechnik.

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

Marti U. (2002): Alptransit Gotthard Basistunnel: Schwerefeldstudie. Technischer Bericht 01-36; Bundesamt für Landestopographie.

Riesen H.-U., B. Schweizer, A. Schlatter, A. Wiget (2005): Tunnelvermessung des BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnels. Geomatik Schweiz 11/2005.

Schätti I. und A. Ryf (2007): AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Grundlagenvermessung, letzte Kontrollen vor dem ersten Durchschlag. Ingenieurvermessung 2007, Graz.

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

Schlatter A. und U. Marti (2005): Höhen transformation zwischen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02. Geomatik Schweiz 8/2005.

Schlatter A. und U. Marti (2007): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz

«LV95». Teil 12: Landeshöhennetz «LHN95». swisstopo Doku Nr. 20.

Schneider D. und R. Haag (1995): AlpTransit Gotthard Basistunnel: Höhengrundlagennetz auf der Basis des Landesnivellements. Technischer Bericht 95–22, Bundesamt für Landestopographie.

Schneider D, U. Marti und A. Wiget (1996): Die neue Landesvermessung der Schweiz LV95 als Grundlage für die Vermessung der neuen Eisenbahn-Alpentransversen «AlpTransit». Beiträge zum XII. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Signer T. (2002): Landesvermessung LV95: Übersicht und Stand des Projektes. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 1/2002.

Adrian Wiget
Dr. Urs Marti
Dr. Andreas Schlatter
Bereich Geodäsie
Bundesamt für Landestopografie
swisstopo
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern
adrian.wiget@swisstopo.ch

ABONNEMENTS

BESTELLUNGEN
unter folgender Adresse

SIGImedia AG

Pfaffacherweg 189, Postfach 19
CH-5246 Scherz
Telefon 056 619 52 52
Telefax 056 619 52 50

Jahresabonnement 1 Jahr:
Inland sFr. 96.-, Ausland sFr. 120.-