Astrogeodätisches Profil am CERN

Autor(en): **Willi, Daniel / Azumi Koch, Julia / Weyer, Benjamin**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Cadastre : Fachzeitschrift für das schweizerische Katasterwesen**

Band (Jahr): **- (2022)**

Heft 40

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-1002785

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Astrogeodätisches Profil am CERN

Die Europäische Organisation für Kernforschung (CERN) mit Sitz in Genf betreibt den leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger der Welt, den «Large Hadron Collider» (LHC). Der LHC wird um das Jahr 2040 sein Betriebsende erreichen. Der künftige Teilchenbeschleuniger, «Future Circular Collider» (FCC), befindet sich momentan in der Studienphase. Geodätische Grundlagen sind dabei für ein solches Infrastruktur-Grossprojekt unentbehrlich. In diesem Kontext hat das Bundesamt für Landestopografie swisstopo in Zusammenarbeit mit dem CERN, der ETH Zürich und der HEIG-VD ein astrogeodätisches Profil mit einer bisher unübertroffenen Genauigkeit erstellt. Dieses wird als Grundlage für die genaue Geoidmodellierung am CERN dienen.

Genaue geodätische Grundlagen sind unentbehrlich für grosse Infrastrukturprojekte. Dies wird am Beispiel des Baus eines Tunnels offensichtlich. Auf beiden Seiten des zukünftigen Bauwerks müssen Fixpunkte vorhanden sein, damit der Tunnelvortrieb von beiden Seiten aus vermessen werden kann und sich die beiden Bauequippen in der Mitte treffen. Die geodätischen Grundlagen beschränken sich aber nicht nur auf die Fixpunkte für die Lage und die Höhe. Sie umfassen oft ein spezifisches Koordinatensystem, eine geeignete Kartenprojektion und ein spezifisches lokales Geoidmodell. Je grösser ein Bauwerk und je höher die Genauigkeitsanforderungen, desto höher sind die Anforderungen an die Genauigkeit dieser geodätischen Grundlagen.

Das Betriebsende des bestehenden Teilchenbeschleunigers «Large Hadron Collider» (LHC) ist für 2040 vorgesehen. Der «Future Circular Collider» (FCC) könnte diesen in Zukunft ablösen. Er gehört zu den entsprechenden Folgeprojekten, die sich derzeit in der Studienphase befinden. Aktuell ist ein Umfang von ca. 100 km in einer Tiefe von 300 m für den Beschleuniger vorgesehen (Abb. 1). Dieser reicht vom Juramassiv bis fast nach Annecy (F), führt unter dem Genfersee hindurch und liegt grösstenteils auf französischem Staatsgebiet.

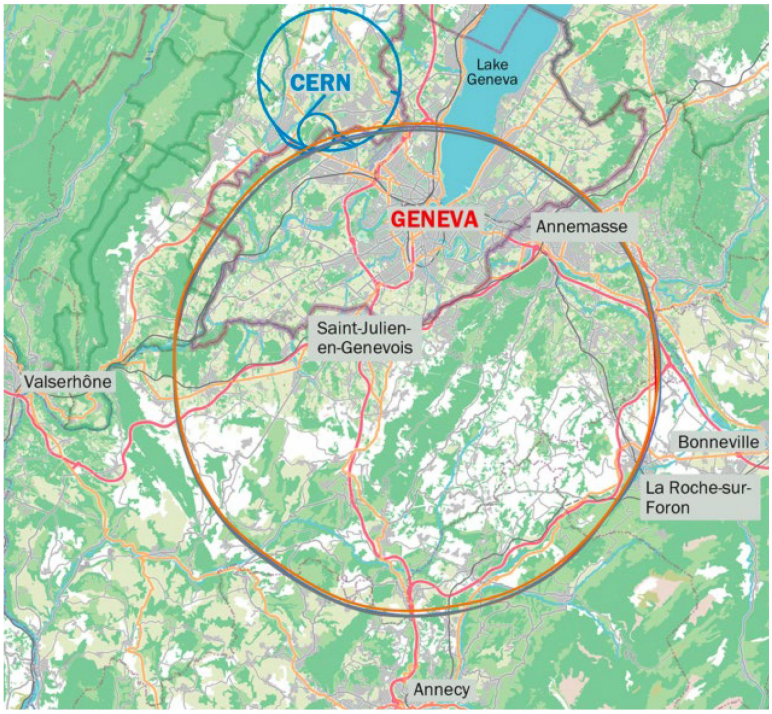


Abbildung 1: Varianten für den FCC. Der FCC reicht vom Jura bis fast nach Annecy (F) und führt unter dem Genfersee hindurch. © CERN

Die sehr breit angelegte FCC-Studie befasst sich mit allen Aspekten des Baus und des Betriebs des zukünftigen Teilchenbeschleunigers. Kern der Studie sind die Physik-Studien und die Entwicklung von Beschleuniger-Technologien wie superleitende Magnete, die den eigentlichen Beschleuniger bilden. Die Studie befasst sich aber auch mit vielen anderen technischen, rechtlichen und sozialen Aspekten des Beschleunigers. Da es sich um einen Tunnel handelt, ist natürlich die Geologie von besonderem Interesse. Aber auch umwelt- und bodenrechtliche Aspekte spielen bei der Planung der Zugangsschächte eine nicht zu unterschätzende Herausforderung, da sich das Projekt über zwei Länder erstreckt.

Ein wichtiger Aspekt fehlt noch in der obigen Aufzählung, nämlich die Geodäsie und somit die geodätischen Grundlagen! Die Geodäsie leistet einen wesentlichen Beitrag an die Studie, denn die Variante «Future Circular Collider» erstreckt sich über zwei Länder mit, die Lage und auch die Höhe betreffend, unterschiedlichen Bezugssystemen. Die Herausforderungen dabei sind: Die Genauigkeiten am Übergang der Schweiz zu Frankreich sind nicht abschliessend bekannt. Hinzukommt, dass die bestehenden Generationen von Teilchenbeschleuniger am CERN teilweise ihre eigenen Koordinatensysteme haben. So ist am CERN zum Beispiel ein Geoidmodell im Einsatz, dass vom Schweizer Geoidmodell CHGeo98 abgeleitet wurde. Genaue geodätische Grundlagen sind nicht nur für den Bau notwendig, sondern auch für das sogenannte «Alingment», die Ausrichtung der einzelnen Komponenten des Teilchenbeschleunigers. Die Absteckung der einzelnen Elemente des Beschleunigerrings

muss mit höchster Genauigkeit erfolgen, damit der Teilchenbeschleuniger erfolgreich betrieben werden kann. Aus all diesen Gründen ist es naheliegend, auf präzisen geodätischen Grundlagen ein neues, projektspezifisches Bezugssystem für den FCC zu entwickeln.

Schlüsselgrösse Geoid

Die Höhenbestimmung geniesst in der Geodäsie traditionell einen besonderen Stellenwert. Die gängige Definition der Höhe ist eng mit dem Schwerefeld der Erde verknüpft. Eine Strasse ist dann «flach», wenn ein Fussball nicht wegrollt, wenn alle Punkte der Strasse also auf derselben Höhe sind. Die meisten Vermessungsinstrumente werden vor der Messung horizontiert, beziehungsweise ins Lot gebracht. Dies geschieht mithilfe einer Libelle, die dem Schwerefeld der Erde ausgesetzt ist. Bekanntermassen weist das Erdschwerefeld Unregelmässigkeiten auf, die sowohl der Topografie wie auch geologischen Strukturen geschuldet sind. Die Punkte, die sich auf derselben Höhe befinden, bilden eine Äquipotentialfläche. Alle diese Punkte weisen das gleiche Schwerepotential auf. Die Äquipotentialfläche, die durch die mittleren Weltmeere verläuft, wird Geoid genannt und alle Punkte auf dem Geoid haben Höhe Null.

Die Teilchen, die im Beschleuniger auf Kollisionskurs gebracht werden, haben eine sehr kleine Masse und werden deswegen kaum durch das Erdschwerefeld beeinflusst. Der Teilchenbeschleuniger muss also möglichst genau in einer geometrischen Ebene liegen (Abb. 2). Gleichzeitig werden fast sämtliche Messinstrumente am Erdschwerefeld ausgerichtet. Um dennoch eine geometrische Ebene abstecken zu können, ist ein genaues Schwerefeldmodell unabdingbar. Das Kernstück dessen ist ein Geoidmodell.

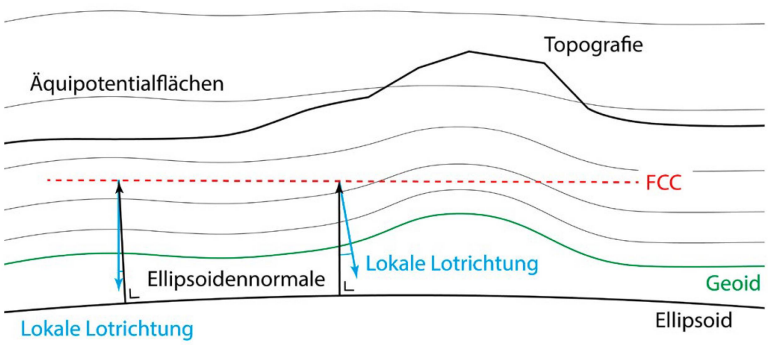


Abbildung 2: Der FCC liegt in einer geometrischen Ebene (rot gestrichelt), die geodätischen Instrumente hingegen werden am lokalen Schwerefeld ausgerichtet (blau). Mithilfe eines Schwerefeldmodells, dessen Kern das Geoidmodell ist (grün), lassen sich die Geometrie und die Physik verknüpfen.

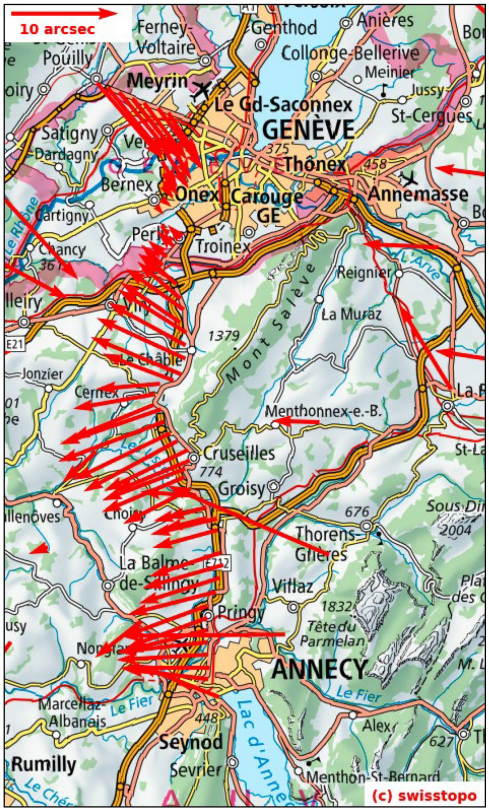
Vertrauen ist gut, Validierung ist besser

Die Genauigkeitsanforderungen des CERN an das Schwerefeldmodell für die näherungsweise Ausrichtung des FCC beträgt 0.1 Millimeter über 225 m. Die Bestimmung eines Schwerefeldmodells mit dieser Genauigkeit ist eine grosse Herausforderung. Nicht nur eine Vielzahl von Messungen werden benötigt, um diese Genauigkeit zu erreichen, sondern auch gute Kenntnisse des Untergrunds und entsprechender Algorithmen. So werden Schweremessungen, Lotabweichungsmessungen und geologische Modelle kombiniert, um ein möglichst genaues Modell zu berechnen. Viele dieser Daten werden von swisstopo bereitgestellt. Die eigentliche Geoidberechnung wiederum ist Gegenstand einer aktuellen Doktorarbeit an der ETH Zürich.

Eine der Schwierigkeiten bei der Geoidbestimmung ist die Validierung der berechneten Modelle. Die Algorithmen sind komplex und setzen sich aus etlichen Berechnungsschritten zusammen. Die eingesetzten Messdaten sind vielzählig und oft inhomogen, weil sie über Jahrzehnte, mit verschiedenen Instrumenten und von verschiedenen Organisationen erfasst wurden. Eine möglichst unabhängige Validierung ist deswegen unabdingbar. Klassischerweise werden Geoidmodelle entweder durch Vergleiche mit anderen Geoidmodellen oder durch den Vergleich mit GNSS-Nivellement-Messungen validiert. Beim GNSS-Nivellement wird der Höhenunterschied zwischen zwei oder mehr Punkten sowohl mittels GNSS wie auch mittels Nivellement bestimmt. Aus der Differenz lässt sich der Unterschied der Geoidundulationen ableiten und mit dem Modell vergleichen. Dieses Vorgehen setzt orthometrische Höhen voraus; daher werden Schweremessungen für die Reduktion der nivellierten Höhenunterschiede eingesetzt.

Eine weitere, interessante Möglichkeit der Validierung von Geoidmodellen sind astrogeodätische Profile. Entlang eines Profils, das möglichst gerade verläuft, werden in regelmässigen Abständen astronomische Messungen durchgeführt, sogenannte Lotabweichungsmessungen. Das Lot zeigt aufgrund von Unregelmässigkeiten im Erdinneren und aufgrund der Topografie nicht exakt zum Erdmittelpunkt[1]. Dieser kleine Unterschied wird Lotabweichung genannt. Die Lotabweichungen werden anschliessend mathematisch integriert, was zu einem Schnitt durch das Geoid führt.

[1] Weil die Erde etwas abgeflacht ist, wird als Referenzfläche nicht eine Kugel verwendet, sondern ein Ellipsoid. Genau genommen ist die Lotabweichung der Unterschied zwischen der Ellipsoidnormalen und der Lotrichtung. Die Ellispoidnormale ist ein Vektor, der rechtwinklig zur Oberfläche des Ellipsoids ist.



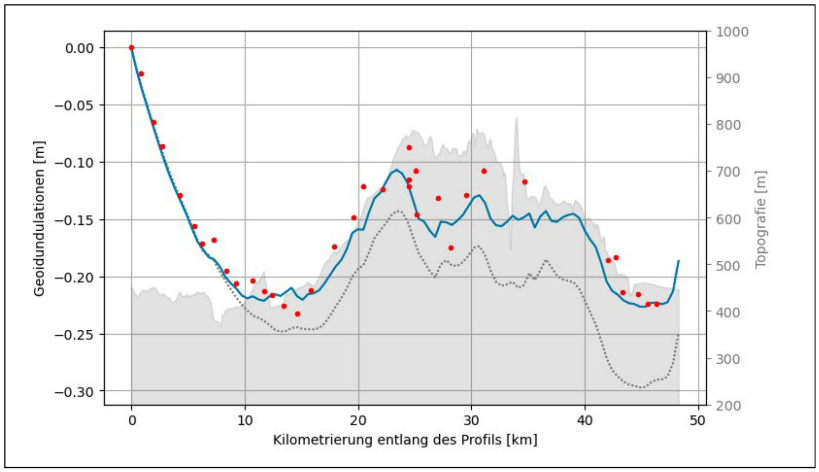


Abbildung 3 oben: Lotabweichungen des astrogeodätischen Profils, neben einigen weiteren Lotabweichungen im Raum Genf

Abbildung 4 oben rechts: Finale Lösung des astrogeodätischen Profils. Blau ist die neue Lösung, Grau gepunktet ist das Schweizer Geoidmodell CHGeo2004 und rot sind die GNSS-Nivellement-Punkte. Grau schraffiert ist die Topografie entlang des Profils gezeigt. Der erste Punkt des Profils (Kilometrierung 0.000) wurde auf 0 m gesetzt.

Diese Messungen können wahlweise noch mit GNSS-Nivellement-Messungen ergänzt werden. Diese zwei Arten von Messungen ergänzen sich ideal, weil sich Lotabweichungen sehr gut zur Erfassung von kleinräumigen Variationen und GNSS-Nivellement sehr gut für mittelräumige Variationen eignen.

Ein astrogeodätisches Profil von über 45 km Länge und mit einer bisher weltweit unerreichten Dichte an astronomischen Messungen wurde letztes Jahr unter der Leitung von swisstopo und in Zusammenarbeit mit dem CERN, der ETH Zürich und der HEIG-VD südlich von Genf im Gebiet des geplanten FCC gemessen. Die von den Fachleuten von swisstopo in 15 Nächten gemessenen Lotabweichungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Neben 61 Lotabweichungen im durchschnittlichen Abstand von ca. 800 m wurden auch Nivellement-Messungen und Schweremessungen durchgeführt. Das Profil wurde so gelegt, dass bestehende Nivellement-Messungen des Kanton Genfs und des Institut national de l'information géographique et forestière de France (IGN) möglichst miteinbezogen werden können. Ein kleines Teilstück von 8.8 km wurde zudem durch das CERN neu nivelliert. Ausgewählte Höhenfixpunkte wurden mit langstatischen GNSS-Messungen bestimmt. In einer grösseren Kampagne haben Fachleute des CERN, der ETH Zürich und der HEIG-VD insgesamt 36 GNSS-Nivellementpunkte gemessen. Die Schweremessungen entlang des Profils wurden von swisstopo mit dem Relativgravimeter Scintrex CG-6 durchgeführt.

Die ersten Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Die geschätzte Genauigkeit der Lotabweichungen beträgt 0.02 Bogensekunden. Das entspricht 0.1 mm über 1 km. Die Messungen sind konsistent zu den GNSS-Nivellement-Beobachtungen und zu bestehenden Modellen, wie das Schweizer Geoidmodell CHGeo2004. Aufgrund der bisher unerreichten Dichte an Messungen sind allerdings viel mehr kleinräumige Details zu sehen. Das astrogeodätische Profil ist somit ein erster, aber essentieller Schritt hin zu hochgenauen Geoidmodellen im FCC-Projektgebiet. Die Berechnung eines hochaufgelösten und sehr präzisen Geoidmodells durch die ETH Zürich ist einer von vielen kleinen Bausteinen, die den FCC überhaupt ermöglichen.

Daniel Willi, Dr. sc. ETH
Geodäsie und Eidgenössische Vermessungsdirektion
swisstopo, Wabern
daniel.willi@swisstopo.ch

Julia Azumi Koch, Master of Science TU München, Doktorandin
ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
jukoch@ethz.ch

Benjamin Weyer, ingénieur topographe INSA Strasbourg
CERN, Genf
benjamin.weyer@cern.ch

Jérôme Carrel, dipl. Ing. FH
Geodäsie und Eidgenössische Vermessungsdirektion
swisstopo, Wabern
jerome.carrel@swisstopo.ch

Urs Marti, Dr. sc. techn. ETH
Geodäsie und Eidgenössische Vermessungsdirektion
swisstopo, Wabern
urs.marti@swisstopo.ch

Weiterführende Informationen

- CERN «Future Circular Collider study»: https://cern.ch/fcc
- Sébastien Guillaume «Determination of a Precise Gravity Field for the CLIC Feasibility Studies», Dissertation, ETH Zürich
- «Kampagne 2020 zur Bestimmung der Lotabweichungen in der Schweiz», Fachzeitschrift «cadastre» 35 – April 2021
- Doku Nr. 22: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95 – Teil 14 – Das Geoid der Schweiz 2004 «CHGeo2004»