

**Zeitschrift:** Cadastre : Fachzeitschrift für das schweizerische Katasterwesen  
**Herausgeber:** Bundesamt für Landestopografie swisstopo  
**Band:** - (2022)  
**Heft:** 40

**Artikel:** Astrogeodätisches Profil am CERN  
**Autor:** Willi, Daniel / Azumi Koch, Julia / Weyer, Benjamin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1002785>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 29.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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 Bauequipen 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 vor-

gesehen. 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) und führt unter dem Genfersee hindurch und liegt grösstenteils auf französischem Staatsgebiet.

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 Abstimmung der einzelnen Elemente des Beschleunigerrings

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



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.

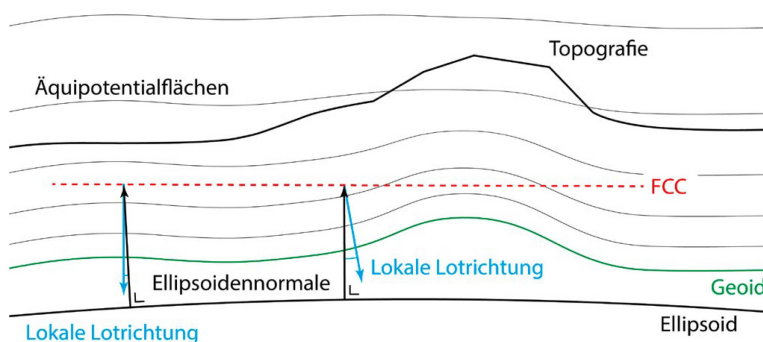


Abbildung 2: Der FCC liegt in einer geometrischen Ebene (rot gestrichelt), die geodätischen Instrumente hingegen werden am lokalen Schwerefeld ausgerichtet (blau). Mithilfe eines Schwerefeldmodells, dessen Kern das Geoidmodell ist (grün), lassen sich die Geometrie und die Physik verknüpfen.

### 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<sup>1</sup>. Dieser kleine Unterschied wird Lotabweichung genannt. Die Lotabweichungen werden anschliessend mathematisch integriert, was zu einem Schnitt durch das Geoid führt.

<sup>1</sup> 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 Ellipsoidnormale ist ein Vektor, der rechtwinklig zur Oberfläche des Ellipsoids ist.



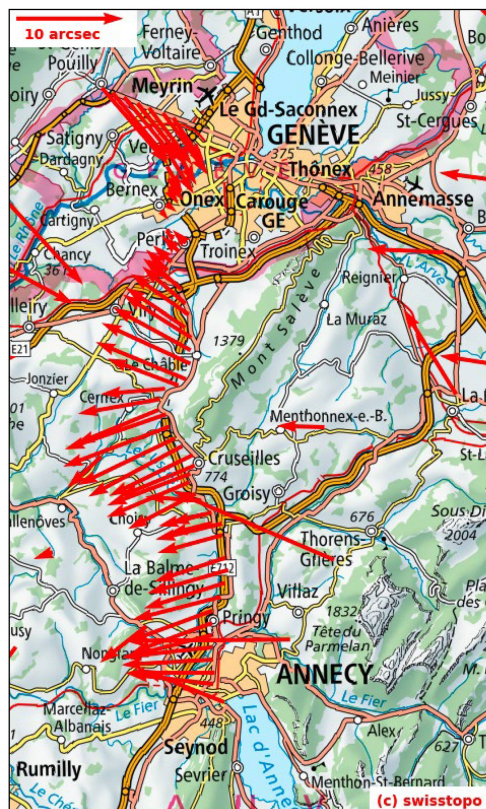
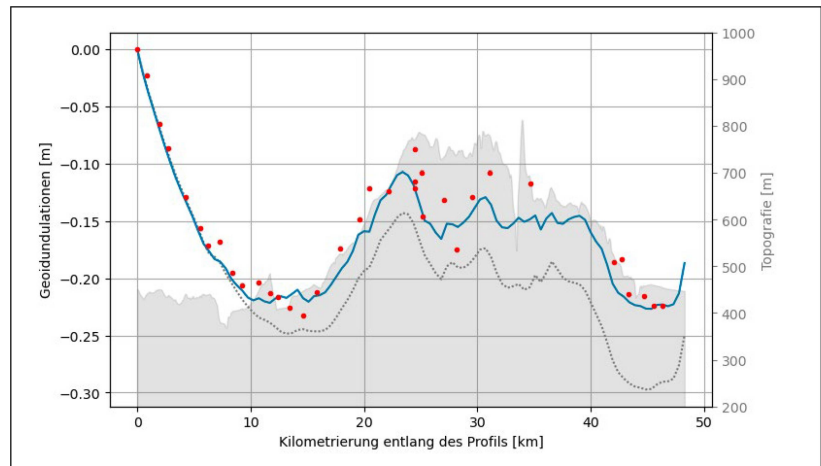


Abbildung 3 oben:  
Lotabweichungen des  
astrogeodätischen Profils,  
neben einigen weiteren  
Lotabweichungen im  
Raum Genf

Abbildung 4 oben rechts:  
Finale Lösung des astro-  
geodätischen 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-Mes-  
sungen 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 mittlerräumige Variationen eignen.

Ein astrogeodätisches Profil von über 45 km Länge und  
mit einer bisher weltweit unerreichten Dichte an astro-  
nomischen 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 Ab-  
stand von ca. 800 m wurden auch Nivellement-Messun-  
gen und Schweremessungen durchgeführt. Das Profil  
wurde so gelegt, dass bestehende Nivellement-Messun-  
gen des Kantons 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 grö-  
ßeren Kampagne haben Fachleute des CERN, der ETH  
Zürich und der HEIG-VD insgesamt 36 GNSS-Nivelle-  
mentpunkte gemessen. Die Schweremessungen entlang  
des Profils wurden von swisstopo mit dem Relativgravi-  
meter Scintrex CG-6 durchgeführt.

Die ersten Ergebnisse der Berechnungen sind in Ab-  
bildung 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 uner-  
reichten 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 präzi-  
sen Geoidmodells durch die ETH Zürich ist einer von  
vielen kleinen Bausteinen, die den FCC überhaupt er-  
möglichen.

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»