

Neues Schweizer Höhensystem



© swisstopo

Studie zur Modernisierung des
Höhenbezugssystems und -rahmens in der Schweiz

Teil II – Definition des Systems
und Analyse der technischen Konsequenzen

Dr. Daniel Willi
Dr. Andreas Schlatter
Dr. Urs Marti
Elisa Borlat
Dr. Sébastien Guillaume
Jérôme Carrel



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo

**Dieser Bericht befindet sich in der
Konsultation. Wir laden Sie ein, ihn zu lesen
und uns Ihre Kommentare und Vorschläge an
folgende E-Mail-Adresse zu schicken
daniel.willi@swisstopo.ch**

Titelbild: statische GNSS-Messungen am Punkt LV95 «Sanetschpass» (S. Condamin)

Impressum

© 2024 Bundesamt für Landestopografie swisstopo

Redaktion:
Bundesamt für Landestopografie swisstopo
Geodäsie und Eidgenössische Vermessungsdirektion
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern

Telefon: +41 58 469 01 11
E-Mail: vermessung@swisstopo.ch



Management Summary

Der vorliegende zweite technische Bericht umfasst die Definition des neuen Höhensystems, das Realisierungs- und Transformationskonzept sowie einige Ansätze für dessen Einführung.

Das neue System basiert auf Normalhöhen, die von geopotentiellen Koten abgeleitet werden. Die Normalhöhen weisen theoretische Vorteile in Bezug auf die orthometrischen Höhen auf, die beim LHN95 verwendet wurden.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt die Einführung eines kinematischen Modells. Die vertikalen differentiellen Höhenänderungen zwischen dem Mittelland und den Alpen betragen 1 bis 2 mm pro Jahr und summieren sich im Laufe der Jahre, bis sie schrittweise auch im alltäglichen Gebrauch signifikant werden. Allein die Modellierung von Intra-frame-Deformationen kann die Langlebigkeit des Höhenbezugsrahmens für eine zentimetergenaue und einheitliche Präzision in der gesamten Schweiz garantieren.

Die Verwaltung des kinematischen Modells wird durch Transformationsdienste vereinfacht. Die Höhen von offiziellen Geodaten werden zur Referenzepoche geführt, also im Realisierungsjahr des Bezugsrahmens. Sie verändern sich nicht im Laufe der Zeit, genau wie es bereits heute der Fall mit LN02-Höhen ist. Für die meisten Anwendungen wird das kinematische Modell nur einmalig bei der Höhenbestimmung berücksichtigt werden müssen.

Eine strenge Transformation zwischen LHN95 und dem neuen Höhenbezugsrahmen wird bestimmt. Für den Übergang von LN02 zu LHN95 findet eine Residualtransformation statt. Dafür müssen mit statischen GNSS-Messungen Transformationsstützpunkte erstellt werden.

Schliesslich wird in Zusammenarbeit mit einigen Kantonen im Rahmen von sogenannte «Proofs of Concept» die Machbarkeit des gewählten Ansatzes überprüft. Diese Versuche fliessen dann in die definitiven Transformations- und Realisierungskonzepte ein.

Gleichzeitig sind alle Begleitmassnahmen – insbesondere die Kommunikations- und Finanzierungsmodelle – vorzubereiten, um die Einführung eines neuen offiziellen Höhensystems in der Schweiz bis zum Jahr 2030 zu ermöglichen.





Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Definition des neuen Systems	9
2.1. Grundsätze und Ziele	9
2.2. Grundlegende Definitionen	9
2.3. Produkte	10
2.4. Nomenklatur	11
2.1. Notationskonventionen	11
2.2. Formelle und rechtliche Aspekte	11
2.3. Zusammenfassung	12
3. Umsetzungskonzept	13
3.1. Berechnung der geopotentiellen Koten	13
3.1.1. Grunddaten und Netze	13
3.1.2. Berechnungsablauf	13
3.1.3. Datumsdefinition	15
3.2. Berechnung der Normalhöhen	16
3.3. Geoidbestimmung	17
3.3.1. Messungen und Daten	17
3.3.2. Konzept und Methode	17
3.4. Umgang mit Restklaffen	18
3.5. Aktualisierung der Bezugsrahmen	18
3.6. Zusammenhang mit übergeordneten Systemen	19
4. Kinematisches Modell	21
4.1. Verwendung des kinematischen Modells	21
4.1.1. Anschluss an Fixpunkte	21
4.1.2. Verwendung eines GNSS-Positionierungsdienstes	21
4.1.3. Postprozessierte GNSS-Messungen	21
4.1.4. Verwendung eines PPP-Dienstes	21
4.2. Umsetzung des kinematischen Modells	21
4.2.1. Schätzung der vertikalen Verschiebungen von Fixpunkten	22
4.2.2. Interpolationsmethode	23
5. Geodatenmodelle	25
5.1. Definition des neuen Bezugssystems in INTERLIS 2	26
5.2. Anpassungen des Basismoduls des Bundes	27
5.3. Empfehlungen für die Berücksichtigung der Kinematik	27
5.4. Empfehlungen für das Geodatenmodell der amtlichen Vermessung DMAV	28
6. Transformationskonzept der bestehenden Geodaten	29
6.1. Transformationsalgorithmus	29
6.2. Residualtransformation	30
6.2.1. Interpolationsalgorithmus	31
6.3. Umsetzung	31



6.3.1. «Proof of Concept» mit den Kantonen	31
6.3.2. Verpflichtung zur Transformation der bestehenden Höhendaten	31
7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	33
Bibliografie	35
Abbildungsverzeichnis	37
Tabellenverzeichnis	39
Glossar	41



1. Einleitung

Mit der Entwicklung der GNSS¹ und der Aussicht, bald eine Höhengenaugigkeit im Zentimeterbereich zu erreichen, können bedeutende Fortschritte gegenüber den aktuellen relativen oder absoluten Höhenbestimmungsmethoden im LN02-System in Betracht gezogen werden, sowohl in technischer Hinsicht wie auch bezüglich der Effizienz.

Um diese Vorteile nutzen zu können, ist die dauerhafte Bestimmung eines neuen Höhenbezugssystems – dem CHVRS² – für die gesamte Schweiz erforderlich. Das System muss mit den übergeordneten internationalen Systemen kompatibel sein und den aktuellen weltraumgeodätischen Verfahren angepasst sein.

Der vorliegende technische Bericht folgt auf den internationalen Vergleich im ersten Bericht. Im Rahmen des Projekts «swiss height system» hat er zum Ziel, die Definition des neuen Höhensystems der Schweiz zu konkretisieren – und dabei den Stand der Wissenschaft und die Erfahrungen anderer Länder auf die Schweiz zu übertragen.

Das neue Höhensystem basiert auf geopotentielle Koten und Normalhöhen. Zudem wird – mit dem Ziel, einen möglichst langen Fortbestand des Höhenbezugsrahmens sicherzustellen – ein kinematisches Modell bestimmt, damit die in der Schweiz vorhandenen Intra-frame-Deformationen berücksichtigt werden können.

Der vorliegende Bericht enthält die grundlegenden Definitionen des neuen Höhensystems der Schweiz, das Umsetzungskonzept, die Anwendung eines kinematischen Modells, einen Modellierungsvorschlag in INTERLIS sowie das Transformationskonzept der bestehenden Höhendaten.

¹ GNSS ist die Abkürzung für *Global Navigation Satellite System* und ein Sammelbegriff für die wichtigsten Navigationssatellitensysteme wie GPS (USA), Galileo (EU), GLONASS (Russland) und Beidou (China).

² *Swiss Verticale Reference System*





2. Definition des neuen Systems

2.1. Grundsätze und Ziele

Die Bestimmung des neuen Höhensystems richtet sich nach folgenden Grundsätzen und Zielen. Im Wesentlichen sind die Anforderungen an ein Höhensystem identisch wie die Anforderungen bei der Einrichtung des LHN95. Die folgenden Punkte sind deshalb sehr ähnlich wie die in Schlatter (2007) erwähnten Grundsätze und Ziele.

- **Internationale Kompatibilität** – Das neue Höhensystem ist mit den europäischen und internationalen Standards und Konventionen kompatibel; Pragmatische Gründe und Schweizer Besonderheiten können dazu führen, dass von dieser Regel abgewichen wird.
- **Kompatibilität mit der Satellitengeodäsie** – Im Zeitalter der Satellitengeodäsie ist das neue Höhensystem der Schweiz mit den weltraumgeodätischen Verfahren und insbesondere mit dem GNSS kompatibel.
- **Allgemeine Einführung** – Das neue Höhensystem der Schweiz wird als neues offizielles System eingeführt. Somit wird es den Anforderungen der nationalen Vermessung, der amtlichen Vermessung, der Geoinformation und denjenigen weiterer Nutzerinnen und Nutzer gerecht.
- **Nachhaltigkeit** – Das neue Höhensystem wird während mehrerer Jahrzehnte in Kraft sein. Es hat kein Ablaufdatum und ist daher auf potentiell unbegrenzte Zeit gültig.

2.2. Grundlegende Definitionen

Definition 1 – Das neue Höhensystem basiert auf geopotentiellen Koten (C), von denen Normalhöhen und orthometrische Höhen abgeleitet werden.

Die Mehrheit der strengen Höhensysteme verwendet entweder Normalhöhen oder orthometrische Höhen. Während für offizielle Höhen eine Höhenart festgelegt werden muss, ist es für wissenschaftliche und technische Zwecke unumgänglich, die Differenz zwischen den Normalhöhen und den orthometrischen Höhen genau zu kennen.

swisstopo muss daher in der Lage sein, beide Höhenarten – Normalhöhen und orthometrische Höhen – zu berechnen.

In anderen Worten ist die geopotentielle Kote C_P eines Punktes P die Differenz zwischen dem Potential der Referenzfläche W_0 und dem Erdschwerepotential W_P des Punktes, also $C_P = W_0 - W_P$.

Diese Definition entspricht der Definition des internationalen Höhenbezugssystems (vgl. Resolution Nr. 1 2015 der International Association of Geodesy).

Definition 2 – Das Referenzpotential W_0 unterliegt der Realisierung des neuen Höhensystems. Es wird mit der «no net translation»-Bedingung auf einer Auswahl von stabilen Punkten in der Schweiz berechnet.

Die «no net translation»-Bedingung bedeutet, dass es keine Verschiebung des Referenzpunktnetzes gibt. Die Summe der Verschiebungen dieser Punkte beträgt entsprechend null.

Definition 3 – Die Höhen sind Normalhöhen.

Während für die Normalhöhen keine Hypothese zur Massenverteilung der Erde nötig ist, hängen die orthometrischen Höhen von der mittleren Schwere entlang der Lotlinie ab. So wird sich die Kenntnis der Unterschiede zwischen den Normalhöhen und den



orthometrischen Höhen in Zukunft kontinuierlich verbessern, ohne die Normalhöhen zu beeinflussen.

Für eine günstige Fehlerfortpflanzung und um die Langfristigkeit zu garantieren, ist es von Vorteil, ein System mit Normalhöhen zu definieren.

Definition 4 – Das Normalschwerefeld wird durch das GRS80-Ellipsoid definiert.

Gemäss der Resolution Nr. 1 1979 der International Association of Geodesy.

Die Normalhöhen hängen vom Referenzellipsoid ab. Die Normalschwere zur Berechnung der Normalhöhen wird mithilfe des Referenzellipsoids berechnet.

Es ist zu berücksichtigen, dass das Referenzellipsoid für die Lage das Bessel-Ellipsoid ist (gemäss Definition des Bezugssystems CH1903+). In der Praxis ist es oft nicht möglich, im selben Instrument gleichzeitig zwei verschiedene Ellipsoide zu verwenden. Deshalb wird das Quasigeoid analog zum Lagebezugssystem bereitgestellt – und zwar im Bezugssystem CH1903+ und entsprechend auf dem Bessel-Ellipsoid.

Definition 5 – Die Parameter, Beobachtungen und Daten liegen im «mean-tide»-Gezeitensystem vor oder werden entsprechend reduziert.

Definition 6 – Das geometrische Bezugssystem für das neue Höhensystem ist CHTRS. In anderen Worten: Das Potential des Punktes W_P ist eine Funktion der Koordinaten \mathbf{X}_P des Punktes. Entsprechend ist $W_P = W(\mathbf{X}_P)$, wobei \mathbf{X}_P in CHTRS vorliegt.

CHTRS ist ein geozentrisches terrestrisches Bezugssystem, das mit ETRS89 kompatibel ist und auf der Erdkruste in der Schweiz gelagert ist.

Definition 7 – Das neue Höhensystem ist kinematisch³. Die Höhe variiert also mit der Zeit. Das kinematische Modell ermöglicht es, eine Höhe von einer Epoche in eine andere Epoche zu transformieren.

Die vertikalen Verschiebungen relativ zu stabilen Punkten erreichen in der Schweiz Werte von rund 1 bis 2 mm pro Jahr. Damit der Fortbestand des Bezugsrahmens sichergestellt werden kann, umfasst das Höhensystem eine kinematische Komponente.

2.3. Produkte

Definition 8 – Jeder Bezugsrahmen umfasst die folgenden Produkte:

- Die offiziellen Höhen der Punkte des Höhennetzes mit einem statischen und einem kinematischen Teil;
- Ein Modell des Quasigeoids mit einem statischen und einem kinematischen Teil;
- Ein Modell der Oberflächenschwere mit einem statischen und einem kinematischen Teil;
- Ein Modell der Lotabweichung an der Oberfläche mit einem statischen und einem kinematischen Teil.

Die kinematischen Teile können den Wert null haben.

Definition 9 – Diese Produkte sind untereinander konsistent, das bedeutet, dass sie vom gleichen Bezugsrahmen und vom gleichen Schwerefeldmodell abgeleitet wurden.

³ Kinematisch bedeutet in diesem Kontext, dass das Höhensystem mit einem Intra-frame-Deformationsmodell versehen ist.



Definition 10 – Die Produkte werden im offiziellen Schweizer Bezugssystem und -rahmen bereitgestellt, also in projizierten LV95-Koordinaten, sowie im europäischen System ETRS89.

2.4. Nomenklatur

Definition 11 – Das neue Höhensystem wird *Swiss Vertical Reference System* (CHVRS) genannt. Die Rahmen werden *Swiss Verticale Reference Frame* xxxx (CHVRFxxxx) genannt, wobei xxxx das Realisierungsjahr des Bezugsrahmens ist.

Definition 12 – Die Produkte folgen der nachstehenden Nomenklatur.

- CHQGE0xxxx und CHKQGE0xxxx für die statischen und kinematischen Teile des Geoidmodells.
- CHGRAVxxxx und CHKGRAVxxxx für die statischen und kinematischen Teile des Schweremodells.
- CHDEFLECxxxx und CHKDEFLECxxxx für die statischen und kinematischen Teile des Modells der Lotabweichung.

Um keine Verwirrung zu stiften, sollte diese Nomenklatur exklusiv wie hier beschrieben verwendet werden, und jedes neue Element wäre mit einer neuen Abkürzung zu versehen.

2.1. Notationskonventionen

Definition 13 – Ab Einführung des neuen Höhensystems muss bei jeder CHVRFxxxx Höhe zwingend der Bezugsrahmen CHVRFxxxx erwähnt werden. Zum Beispiel:

1239.943 m CHVRF2030

Diese Angabe kann entweder direkt neben der Höhe stehen – oder allgemein festgehalten werden, z. B. in der Beschriftung eines Plans, am Rande einer Karte oder als Attribut in den Metadaten eines Datensatzes.

Definition 14 – Die Angabe der Epoche ist optional, wird aber empfohlen. In diesem Fall wird die Höhe wie folgt geschrieben:

1239.943 m CHVRF2030 2030.0

Definition 15 – Wird die Epoche nicht angegeben, wird die Höhe als Höhe zur Referenzeпоche des Bezugsrahmens behandelt.

2.2. Formelle und rechtliche Aspekte

Definition 16 – Mit offizieller Höhe ist eine Höhe im aktuellen Bezugsrahmen, entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen und zur Referenzeпоche des Bezugsrahmens gemeint.



2.3. Zusammenfassung

Die folgende Tabelle fasst die im vorliegenden Dokument beschriebenen grundlegenden Definitionen des neuen Höhensystems zusammen.

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Definitionen des neuen Höhensystems CHVRS.

	CHVRS	Bezug im Dokument
Ursprung/Bezug	W_0 unterliegt der Realisierung	Definition 2
Höhenart	Normalhöhe	Definition 3
Normalschwerefeld	GRS80	Definition 4
Gezeitensystem	Mean-tide	Definition 5
	CHVRFxxxx	Bezug im Dokument
Realisierung des Ursprungs	«no net translation» auf mehreren Bezugspunkten	Definition 2
Kinematik	Kinematisches Intra-frame-Modell	Definition 7
Geoid	CHQGEOxxxx	Definition 12



3. Umsetzungskonzept

Dieses Kapitel beschreibt das Umsetzungskonzept des Höhensystems CHVRS, wie es im vorhergehenden Kapitel beschrieben ist. Die Umsetzung umfasst zwei Hauptaspekte: Die Berechnung der geopotentiellen Knoten (inklusive zeitliche Veränderungen) für die Höhenfixpunkte sowie die Bestimmung des Geoids.

3.1. Berechnung der geopotentiellen Knoten

Die Berechnung der geopotenziellen Knoten für das neue Höhensystem basiert zum grossen Teil auf Methoden und Software, die für die Realisierung von LHN95 entwickelt wurden. LHN95 hat viele gemeinsame Eigenschaften mit dem neuen Höhensystem. Die Methoden und Berechnungsabläufe haben sich bewährt, und die Software ist vorhanden. Dies ist von immenssem Vorteil, weil sich dadurch die langwierige und mit Unsicherheiten behaftete Entwicklungsarbeit stark reduzieren lässt. Die detaillierte Beschreibung der Methoden und Berechnungsabläufe ist in den folgenden Abschnitten und in den referenzierten Publikationen zu finden.

3.1.1. Grunddaten und Netze

Für die Realisierung des neuen Höhensystems werden im Wesentlichen die **Nivellementmessungen** des Landeshöhennetzes (LHN) verwendet. Wie bei der Realisierung von LHN95 werden die Daten um einige kantonale Linien ergänzt, die mit derselben Qualitätsanforderungen gemessen wurden wie die Linien des LHN. Der Datensatz wurde seit der Berechnung des LHN95 fortlaufend ergänzt und beinhaltet die neusten Messungen im LHN.

Für die Berechnung der Potentialdifferenzen werden **Schweremessungen** benötigt. Auch für die Schweremessungen existieren Bestandsdaten, die herangezogen werden können. Zwei Datenquellen sind in diesem Kontext relevant:

1. Die erste Datenquelle sind die Schweremessungen entlang der Landesnivellementlinien. Seit 1974 werden diese Messungen regelmässig durchgeführt. Bis Ende 2007 kam hierfür ein LaCoste&Romberg Gravimeter zum Einsatz. Seither werden die Messungen mit einem Scintrex CG-5 bzw. CG-6 durchgeführt. Es existieren aber auch ältere Messungen, die unter der Leitung der Swiss Geodetic Commission zwischen 1953 und 1957 erhoben wurden. Damals kamen Worden-Gravimeter zum Einsatz.
2. Die zweite Quelle ist der Datensatz der gravimetrischen Landesaufnahme der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission. Dieser Datensatz umfasst ca. 30 000 Messungen. Dieser Datensatz erlaubt die Interpolation von Schwerewerten an beliebigen Punkten der Oberfläche.

Diese beiden Schweredatensätze wurden seit der Realisierung von LHN95 ebenfalls laufend ergänzt und beinhalten die neusten Messungen, die somit ebenfalls in die Realisierung des neuen Höhensystems fließen werden.

3.1.2. Berechnungsablauf

Der Berechnungsablauf für die Berechnung von geopotentiellen Knoten auf den Hauptpunkten von LHN95 findet sich in Schlatter (2007). Zusammengefasst sind die Berechnungsschritte wie folgt:

1. Die beobachteten Höhenunterschiede werden unter Zuhilfenahme der Schweremessungen numerisch integriert, um Potentialdifferenzen zu berechnen. Das geschieht faszikelweise, wobei ein Faszikel eine Nivellementkampagne abbildet.
2. Die Messungen werden auf die Hauptpunkte reduziert. Die Hauptpunkte sind die Knotenpunkte (Verbindungen zwischen den Faszikeln sowie die Knoten zwischen den Schlaufen) sowie weitere, manuell ausgewählte Punkte, die als besonders stabil angenommen werden. Alle zusätzlichen Zwischenpunkte werden eliminiert.



3. Die Berechnung der Schlaufenfehler dient der Qualitätskontrolle (Überprüfung der korrekten und vollständigen Berechnung).
4. Die kinematische Ausgleichung ist das Herzstück des Berechnungsablaufs. Die Resultate dieses Berechnungsschritts sind die ausgeglichenen, geopotentiellen Knoten sowie deren Geschwindigkeiten.

Grundsätzlich wird für die Berechnung der geopotentiellen Knoten im neuen Höhensystem auf denselben Ablauf und dieselbe Softwarelösung gesetzt.

Die numerische Integration erfolgt abschnittsweise nach folgender Formel:

$$\Delta C = \sum_i g_i \delta n_i \quad (3.1)$$

Wobei ΔC die Potentialdifferenz des Abschnittes ist, δn_i der nivellierte Höhenunterschied und g_i die interpolierte Schwere für diesen Höhenunterschied sind.

Die Reduktion auf die Hauptpunkte wird ebenfalls beibehalten. Es besteht aber keine Notwendigkeit, dieselben Hauptpunkte wie bei der Berechnung von LHN95 auszuwählen. Die Wahl der Hauptpunkte für die Berechnung des neuen Höhensystems kann neu erfolgen und die neusten Messungen berücksichtigen, wobei grosse Anpassungen weder nötig sein dürften noch erstrebenswert sind.

Die kinematische Ausgleichung, das Kernstück der Berechnung, erfolgt nach dem folgenden Modell:

$$\Delta C_{i,j}^k + \epsilon_{i,j}^k = C_j^0 - C_i^0 + \Delta t (\dot{C}_j - \dot{C}_i) \quad (3.2)$$

Dabei ist $\Delta C_{i,j}^k$ der beobachtete Potentialunterschied zwischen den Punkten i und j zur Messepoche, C_j^0 und C_i^0 sind die geopotentiellen Knoten der Punkte i und j zur Referenzepoche t_0 , Δt ist der Zeitunterschied zwischen der Messepoche und der Referenzepoche ($\Delta t = t_k - t_0$) und \dot{C}_i und \dot{C}_j sind die zeitlichen Ableitungen der geopotentiellen Knoten.



3.1.3. Datumsdefinition

Die beiden, im Rahmen der neuen Landesvermessung 1995 entwickelten Höhenbezugsrahmen⁴ CHVRFyy⁵ und LHN95 wurden damals wie folgt definiert:

Tabelle 3-1: Definition der zwei Höhenbezugsrahmen der neuen Landesvermessung 1995, CHVRFyy und LHN95.

Lagebezugssystem	CHTRS95	CH1903+
Höhenart	Geopotentielle Koten	Orthometrische Höhen
Ausgangspunkt	Fundamentalpunkt Z ₀ in Zimmerwald	Fundamentalpunkt Z ₀ in Zimmerwald
Ausgangshöhe	C ₀ = 880.3459 gpu	H ₀ = 897.9063 m
Lagerung Höhe		
Herkunft	UELN-Lösung 1973/1986	So gewählt, dass H _{RPN} = 373.6000 m
Zugehöriger Höhenbezugsrahmen	CHVRFyy	LHN95
Lagerung Geschwindigkeiten		
$\dot{C} = 0$ auf folgendem Punkt	Aarburg	Aarburg

Beim neuen Höhensystem wird von dieser Definition abgewichen:

- Einerseits entfällt die Systemdualität; Es gibt in Zukunft nur noch ein Schweizer Höhensystem. Bei Bedarf werden Transformationsparameter zu anderen Höhensystemen berechnet und publiziert.
- Andererseits wird das System nicht mehr auf einem einzelnen Punkt gelagert, sondern mit einer «no net translation»-Bedingung auf einer Auswahl von Punkten. Die «no net translation»-Bedingung wird vorzugsweise auf die Höhen angewendet – und nicht auf die geopotentiellen Koten, da die Höhenstabilität der relevante Aspekt ist. Die Auswahl der Punkte wird in der Umsetzungsphase vorgenommen, wobei auf die Langzeitstabilität geachtet wird. Mit dieser Anpassung ist die Realisierung des Höhensystems nicht mehr von einem einzelnen Höhenfixpunkt abhängig und gewinnt sowohl an Flexibilität wie auch an Robustheit.
- Bei der ersten Realisierung wird das Höhensystem mittels einer geeigneten Punkteauswahl auf EVRS gelagert, bei weiteren Realisierungen auf den letzten realisierten Höhenbezugsrahmen.

Die Formel für die «no net translation»-Bedingung lautet:

$$0 = \sum_i (H_i^* - H_i^{ref}) p_i$$

Wobei H_i^* die Normalhöhe des i-ten Höhenfixpunktes ist, der in die Datumsdefinition einfließt und H_i^{ref} die Referenzhöhe desselben Punktes für die Lagerung. p_i ist ein optionales Gewicht (standardmässig 1). Die Referenzhöhe kann, muss aber nicht eine Normalhöhe sein.

⁴ In diesem Bericht wird LHN95 teilweise als Höhensystem bezeichnet, was eigentlich nicht korrekt ist. Im Rahmen der neuen Landesvermessung 1995 wurden zwei Höhensysteme eingeführt, ein global gelagertes und ein lokal gelagertes. Die Systeme wurden aber nicht benannt. Die zugehörigen Höhenbezugsrahmen wurden CHVRFyy und LHN95 genannt.

⁵ Nicht zu verwechseln mit CHVRFxxxx, einem Rahmen des neuen Höhensystems CHVRS.



3.2. Berechnung der Normalhöhen

Die Berechnung der Normalhöhen aus den ausgeglichenen geopotentiellen Koten lautet:

$$H^*(x_P) = \frac{C(x_P)}{\bar{\gamma}}$$

Wobei $H^*(x_P)$ und $C(x_P)$ die Normalhöhe und die geopotentielle Kote des Punktes P mit Koordinate x_P repräsentiert, und $\bar{\gamma}$ ist die mittlere (GRS80) Normalschwere entlang der Normalotlinie. Da $\bar{\gamma}$ aber von der Normalhöhe abhängig ist, ist diese Berechnung iterativ durchzuführen.

Für $\bar{\gamma}$ ist folgende (oder eine mindestens gleichwertige) Formel zu verwenden (Heiskanen & Moritz, 1967):

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 \left[1 - (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) \frac{H}{a} + \frac{H^2}{a^2} \right]$$

Dabei ist φ die ellipsoidische Breite in einem globalen Bezugssystem; H ist die Normalhöhe; a ist die grosse Halbachse des Ellipsoids; f ist die Abplattung und m das Verhältnis zwischen gravitationeller und zentrifugaler Kraft am Äquator.

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM}$$

Mit ω : Rotationsgeschwindigkeit der Erde; b : kleine Halbachse des Ellipsoids; GM : geozentrische Gravitationskonstante.

γ_0 ist die Normalschwere auf dem Ellipsoid (Moritz, 1980):

$$\gamma_0 = \gamma_E \cdot \frac{1 + k \cdot \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}$$

Mit γ_E : Normalschwere am Äquator; e^2 : erste numerische Exzentrizität im Quadrat; k : Konstante der Schwereformel, ausgeschrieben:

$$k = \frac{b \cdot \gamma_P}{a \cdot \gamma_E} - 1$$

Mit γ_P : Normalschwere am Pol.

Für das Bezugssystem GRS80 sind folgende Konstanten und abgeleiteten Grössen zu verwenden:

$$a = 6378137.0000 \text{ m}$$

$$b = 6356752.3141 \text{ m}$$

$$f = \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.257222101} = 0.00335281068118$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 0.00669438002290$$

$$\omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

$$GM = 398600.5 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$\gamma_E = 9.7803267715 \text{ m s}^{-2}$$

$$\gamma_P = 9.8321863685 \text{ m s}^{-2}$$

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} = 0.00344978600308$$



$$k = \frac{b \cdot \gamma_P}{a \cdot \gamma_E} - 1 = 0.001931851353$$

3.3. Geoidbestimmung

Entsprechend der Wahl von Normalhöhen ist die Referenzfläche für die Höhenbestimmung das Quasigeoid. In diesem Kapitel wird aber, wie in anderen Fachpublikationen üblich, der Begriff Geoid auch für das Quasigeoid verwendet.

3.3.1. Messungen und Daten

Die messbaren Grössen des Schwerefeldes sind die Lotabweichung, die Schwere, der Potentialunterschied (aus Nivellement und Schwere), sowie direkte Höhenanomalien (üblicherweise in Form von GNSS-Nivellementpunkten). Es sind in der Schweiz und im grenznahen Ausland genügend Messungen für eine gute Geoidbestimmung vorhanden, einzelne Neumessungen sind jedoch wünschenswert. Insbesondere sollen einzelne alte Lotabweichungsmessungen ersetzt und somit eventuelle systematische Fehler eliminiert werden. Falls möglich, sollen auch noch einige neue GNSS-Nivellement-Punkte bestimmt werden. Diese Punkte liegen bisher fast ausschliesslich entlang der Linien des Landesnivellements. Für eine bessere räumliche Verteilung müssten kantonale Nivellementlinien aus den Rohdaten aufbereitet werden.

Gezielte Kampagnen zum Füllen von Datenlücken im Gravimetrie-Datensatz werden nicht in Betracht gezogen, da dies ziemlich aufwändig ist. Diese Datenlücken bestehen natürlich in erster Linie im Hochgebirge. Grössere Datenlücken dieser Art werden am besten durch einige Lotabweichungsmessungen überbrückt.

Als Referenzmodell für ein lokales Geoidmodell muss ein globales Schwerefeldmodell verwendet werden. Für ein Land wie die Schweiz steht dabei die Verwendung eines hochauflösenden, kombinierten (Satellit und terrestrisch) Modells im Vordergrund.

Für die Berechnung eines präzisen nationalen Geoidmodells muss zumindest ein hochauflösendes digitales Höhenmodell verwendet werden. Eine Auflösung von 10 Metern ist dabei genügend; Für die Schwere-reduktion und die Reduktion der Lotabweichungen ist aber auch die Verwendung eines 2-Meter-Modells sinnvoll.

Ein Bathymetriemodell der grössten Schweizer Seen ist ebenfalls nötig. Dies verbessert in erster Linie die Reduktion der Messungen direkt am Seeufer, ist aber auch für die Interpolation des Geoidmodells über den Seen nützlich, da dort in der Regel keine Messdaten vorhanden sind.

Inwiefern weitere Dichtemodelle für ein nationales Geoidmodell nötig sind, muss noch abgeklärt werden. In erster Linie steht dabei ein Modell der Gletscher (GLAMOS), aber auch die Modellierung der Quartärtäler (GeoQuat) oder ein Modell der Oberflächendichten (SAPHYR).

3.3.2. Konzept und Methode

Für Transformationen zwischen Höhensystemen muss unabhängig von der gewählten Art des Höhensystems die Geoid-/Quasigeoid-Separation modelliert werden. Aus diesem Grund ist es auch möglich, entweder ein Geoidmodell oder ein Quasigeoidmodell zu berechnen und dieses anschliessend zu transformieren.

Eine Bestimmung der zeitlichen Veränderung des Geoids (kinematischer Ansatz) ist mit dem bestehenden Datensatz nicht möglich. Das Geoidmodell wird also weiterhin statisch sein.

Für eine optimale Realisierung des Höhensystems durch ein Geoidmodell muss die, an den Benutzer abzugebende Lösung auf die GNSS-Nivellement-Punkte gezwängt werden (hybride Lösung; Marti, 1997, S. 19). Ansonsten könnten systematische Unterschiede entstehen – je nachdem, ob eine Höhe durch GNSS (plus Geoid) oder Nivellement (korrigiert um Gravimetrie) bestimmt wurde.



Der erste Schritt der Geoidbestimmung besteht in der Reduktion der Beobachtungen um den Einfluss der bekannten Massenmodelle. Klassischerweise handelt es sich dabei um ein globales Schwerefeldmodell und um den Einfluss des digitalen Geländemodells (inkl. Bathymetrie). Weitere bekannte Dichtemodelle könnten ebenfalls berücksichtigt werden, sind aber meist weniger wichtig. Ziel dieses Schrittes ist, ein relativ glattes, leicht zu interpolierendes Restfeld zu erhalten.

Dieses Restfeld wird in einem zweiten Schritt auf eine geeignete Weise interpoliert. Dabei werden die originalen Beobachtungen (Schweren und Lotabweichungen) in Höhenanomalien umgerechnet. Dabei müssen die bekannten Eigenschaften des Schwerefeldes als harmonisches Kraftfeld berücksichtigt werden. In der Schweiz wurde dazu für die offiziellen Geoidmodelle bisher ein Kollokationsansatz nach kleinsten Quadraten verwendet. Andere Methoden sind jedoch auch möglich. Ein Nachteil der Kollokationsmethode ist, dass eine Matrix mit der Dimension «Anzahl Beobachtungen» invertiert werden muss. Dies schränkt deren Einsatz auf relativ kleine Gebiete ein.

Der dritte Schritt der Geoidbestimmung besteht darin, dass die zuvor reduzierten Einflüsse der Massenmodelle wieder hinzugefügt werden – dieses Mal jedoch in Form von Höhenanomalien oder Geoidhöhen. Die Berechnung dieses dritten Schrittes erfolgt auf Punkten in einem regelmässigen Gitter. Das so generierte Raster wird dann an die Endnutzerinnen und Endnutzer abgegeben.

Da das Quasigeoid einen raueren Verlauf zeigt als das Geoid, kann man schon jetzt sagen, dass die Gitterauflösung eines neuen Geoidmodells höher sein wird als beim bisherigen Modell CHGeo2004 (1 km, resp. 30 Bogensekunden).

3.4. Umgang mit Restklaffen

Bei der Realisierung des Höhensystems entstehen unweigerlich Restklaffen. Nivellement-Messungen sind typischerweise mit langwelligen, systematischen Fehlern und GNSS-Messungen mit kurzwelligen, stochastischen Fehlern behaftet.

Im Rahmen der Realisierung ist zu untersuchen, ob es möglich ist, eine saubere spektrale Aufteilung der Restklaffen vorzunehmen, um dann die verschiedenen Anteile der jeweiligen Quelle zuzurechnen. Bei der Realisierung von LHN95 hat sich dies als nicht umsetzbar herausgestellt, weswegen die Restklaffen in das Geoid integriert wurden (durch eine gezwängte Lagerung des Geoids auf GNSS-Nivellement-Messungen).

3.5. Aktualisierung der Bezugsrahmen

Das Höhensystem ist so definiert, dass die Bezugsrahmen eine möglichst lange Lebenszeit haben. Die Erfahrung vom Übergang von LV03 zu LV95 zeigte, dass eine Änderung des Bezugsrahmens zwingend mit hohen Kosten verbunden ist. Das führt zwangsläufig zu einem ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis, ausser, die Neuerung bringt signifikante Vorteile. Der aktuell geltende Höhenbezugsrahmen ist LN02 aus dem Jahr 1902. Er ist also über 120 Jahre alt. Möglicherweise hat der neue Höhenbezugsrahmen eine ähnliche Lebenszeit.

So oder so wird die Konsistenz zwischen den Produkten beibehalten, damit nicht gegen die Definition verstossen wird. Zudem obliegt die Entscheidung über die Einführung eines neuen Höhenbezugsrahmens in jedem Fall swisstopo. Es sind keine Automatismen vorgesehen. Hier einige Beispielsituationen, die zur Realisierung eines neuen Bezugsrahmens führen können:

- inakzeptable Verschlechterung des geltenden Bezugsrahmens
- neue swisstopo-interne oder swisstopo-externe Bedürfnisse
- Einführung neuer Technologien
- gesetzlicher Auftrag



3.6. Zusammenhang mit übergeordneten Systemen

Die präzise Definition des Höhensystems ist eine der Voraussetzungen für eine gute Kompatibilität mit den übergeordneten Systemen. Der Übergang von Rahmen übergeordneter Systeme wie EVRS und IHRS zu den Rahmen Schweizer Systeme wird durch Transformationen gewährleistet. Im Idealfall bestehen diese Transformationen nur aus einem ΔW_0 (oder ΔH). Es ist jedoch wahrscheinlich, dass Unzulänglichkeiten eine komplexere Transformation erfordern, z. B. eine interpolierter Transformationsfläche oder ein Geoidmodell, das mit dem übergeordneten System kompatibel ist.

Es folgt:

$$H_{\text{VRF}} = \frac{H_{\text{CHVRF}}^* \bar{\gamma} + \Delta W_0}{g_0}$$

H_{VRF} ist eine Höhe im Zielhöhenystem, H_{CHVRF}^* ist eine Höhe im CHVRS, $\bar{\gamma}$ ist die mittlere Normalschwere entlang der Ellipsoidennormale und g_0 ist die Beschleunigung, die der Höhenart des Zielhöhenystems entspricht.

Bei der Veröffentlichung eines neuen übergeordneten Bezugsrahmens und bei nachweislichem Bedarf stellt swisstopo den Nutzerinnen und Nutzern eine geeignete Transformation dieses Rahmens zum geltenden Schweizer Rahmen zur Verfügung.





4. Kinematisches Modell

4.1. Verwendung des kinematischen Modells

Die Verwendung des kinematischen Modells unterscheidet sich je nach Anwendungsfall. Die folgenden Abschnitte erläutern die möglichen Fälle.

4.1.1. Anschluss an Fixpunkte

In der Nähe der Nivellementlinien haben die Nutzerinnen und Nutzer mittels Fixpunkten Zugang zum Höhenbezugsrahmen. Die kantonalen Nivellementlinien sind dort ebenfalls angeschlossen. Für verhältnismässig kurze Nivellierwege, das heisst, weniger als ein paar Kilometer, kann das kinematische Modell vernachlässigt werden; Die Nutzerinnen und Nutzer arbeiten nur mit Koordinaten zur Referenzepoche. Die Messepoche muss dann nicht berücksichtigt werden.

4.1.2. Verwendung eines GNSS-Positionierungsdienstes

Die GNSS-Positionierungsdienste (z.B. RTK) werden mehrere «Mountpoints» zur Verfügung stellen und überlassen damit den Nutzerinnen und Nutzern die Wahl der Epoche, auf die sich die Koordinate bezieht. Der Standardfall ist die Verwendung von Koordinaten zur Referenzepoche des Bezugsrahmens. Das kinematische Modell wird folglich vom Positionierungsdienst angebracht. Die Nutzerinnen und Nutzer müssen sich nicht um das kinematische Modell kümmern.

4.1.3. Postprozessierte GNSS-Messungen

Für eine präzise Auswertung muss das Post-Processing der GNSS-Messungen zur Messepoche erfolgen. Die Nutzerin oder der Nutzer muss die Daten der AGNES-Station zur Messepoche benutzen. Danach müssen die Ergebnisse in die Referenzepoche des Bezugsrahmens überführt werden. Diese Transformation wird mithilfe eines Webdiensts durchgeführt. Zu Beginn verlangt der Webdienst folgende Informationen:

- Ostkoordinate, Nordkoordinate (LV95) und Höhe des Punktes
- Epoche der Höhe vor der Transformation
- Gewünschte Epoche nach der Transformation (Standardwert: Referenzepoche des Referenzrahmens)

Der Dienst berechnet die Höhe in der gewünschten Epoche, im vorliegenden Fall die Epoche des Bezugsrahmens.

4.1.4. Verwendung eines PPP-Dienstes

Die Nutzerinnen und Nutzer von PPP-Diensten (oder anderer globaler Dienste) erhalten geozentrische Koordinaten in einem globalen oder kontinentalen System, beispielsweise ITRS oder ETRS. Die Koordinaten müssen also zuerst in den Schweizer Bezugsrahmen transformiert werden (mithilfe eines Webdienstes wie REFRAAME), bevor sie in die richtige Epoche transformiert werden, wie im Fall der postprozessierten GNSS-Messungen.

4.2. Umsetzung des kinematischen Modells

Das kinematische Modell wird folgende Eigenschaften aufweisen:

- Gute Abbildung der vertikalen Bewegungen der Erdkruste, ohne lokale Effekte. Unter «lokalen Effekte» versteht man die Phänomene, die sich auf einen Hang bzw. ein Rutsch- oder ein Senkungsgebiet beschränken. Die bekannten Senkungsgebiete, wie beispielsweise die



Linthebene (Kantone Glarus, St. Gallen, Schwyz) oder die Region um Le Locle (Kanton Neuchâtel), und solche, die nicht auf tektonische Phänomene zurückzuführen sind, müssen vom Modell ausgeschlossen werden.

- Das kinematische Modell liefert für jeden in der Schweiz liegenden Punkt die vertikale Verschiebung, die dieser Punkt zwischen t_1 und t_2 erfahren hat:

$$\Delta h = f(E, N, t_1, t_2)$$
$$h(t = t_2) = h(t = t_1) + \Delta h$$

- Das Modell ist im mathematischen Sinn stetig, sowohl in räumlicher als in zeitlicher Hinsicht; Es enthält also keine Sprünge. Die erste Ableitung ist nicht zwingend stetig.
- Das kinematische Modell repräsentiert jederzeit die beste bekannte Annäherung des Geschwindigkeitsfelds der Erdkruste in der Schweiz. Das Modell kann aktualisiert werden, ohne die Konsistenz mit den vorher publizierten Modellen gewährleisten zu müssen. In der Praxis bedeutet das, dass Höhen nicht beliebig zwischen Epochen hin und zurück transformiert werden können, ohne eine Konsistenzeinbusse zu riskieren, falls das Modell zwischenzeitlich aktualisiert wurde.
- Sollte diese Voraussetzung für einen spezifischen Verwendungsfall inakzeptabel sein, müssen die betreffenden Höhen in der Messepoche abgelegt werden. Es kann tatsächlich sein, dass eine Anwendung Transformationen zwischen mehreren Epochen erfordert, die dauerhaft konsistent sind.

4.2.1. Schätzung der Höhenänderung von Fixpunkten

Die relativen Höhenänderungen einer Auswahl von Nivellement-Punkten wurden bereits bei der Realisierung von LHN95 berechnet. Die Abbildung 4-1 zeigt das Ergebnis. Das kinematische Modell des neuen Höhensystems wird hauptsächlich auf dieser Methode basieren, da sie momentan die präzisesten und zuverlässigsten Ergebnisse liefert. Eine weitere wichtige Informationsquelle über die vertikalen Verschiebungen sind die permanenten GNSS-Stationen des AGNES-Netzes.

Je nach Bedarf und künftiger Entwicklung der Technologien können weitere Methoden diese Messungen ergänzen, insbesondere die GNSS-Messungen und die Radarinterferometrie (InSAR).

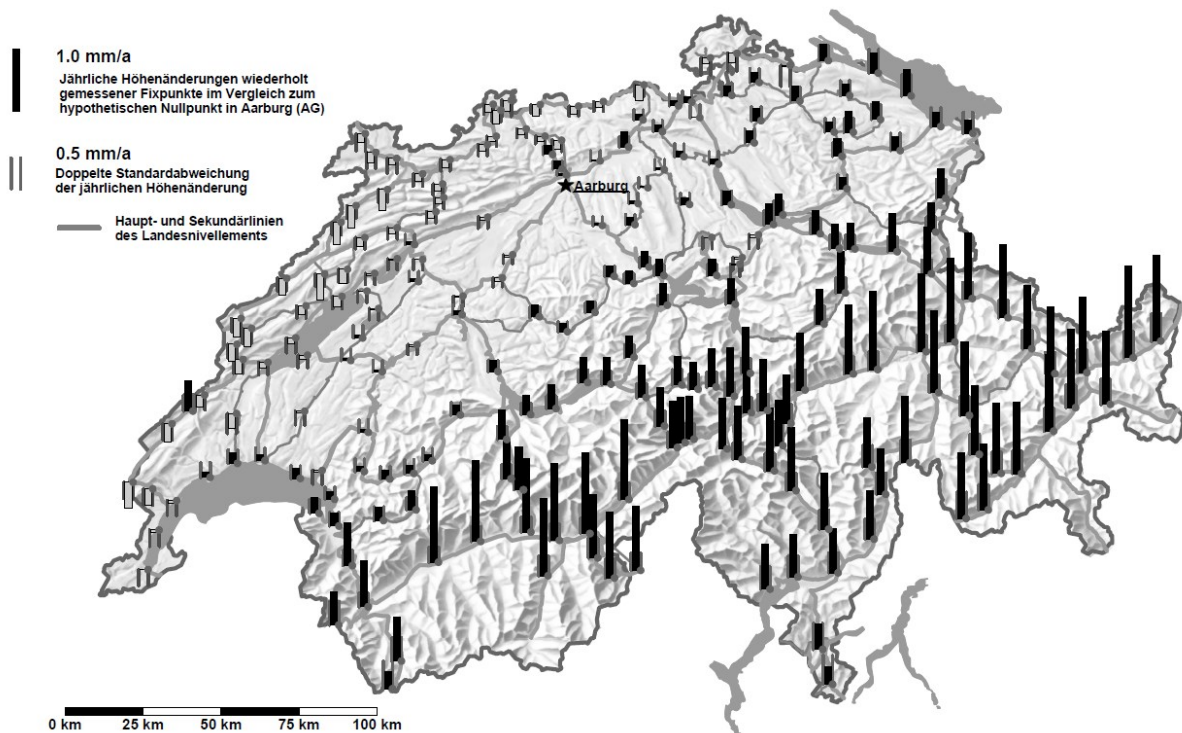


Abbildung 4-1: Relative Höhenänderungen gegenüber Aarburg einer Auswahl von Fixpunkten des Landesnivellements. Quelle: Schlatter (2007).

4.2.2. Interpolationsmethode

Grosse Bedeutung kommt der Interpolationsmethode der Höhenänderungen zu. Eine Interpolation ist erforderlich, um die Höhenänderungen zwischen den Nivellementlinien und den Fixpunkten zu präzisieren.

Es gibt mehrere Methoden für die zweidimensionale Interpolation von verstreuten Daten (unregelmässiges Gitter). Einige davon sind die folgenden:

- Inverse Gewichtung nach der Entfernung
- Lineare Interpolation auf einem unregelmässigen Netz von Dreiecken
- Nichtlineare Interpolation auf einem unregelmässigen Netz von Dreiecken
- Interpolation durch «Radial Basis Functions»

Die Interpolation durch «Radial Basis Functions» führt zum Nachteil, dass die Prädiktion ohne Messungen nach null konvergiert. Dies entspricht beim Geschwindigkeitsfeld der Erdkruste nicht der Realität. Diese Methode scheint im vorliegenden Fall folglich ungeeignet. Die denkbaren Methoden sind die lineare oder nichtlineare Interpolation auf einem unregelmässigen Netz von Dreiecken sowie eine Interpolation basierend auf der inversen Gewichtung nach der Entfernung.

Die lineare Interpolation auf einem unregelmässigen Netz von Dreiecken hat den Vorteil, dass sie bei Geomatikerinnen und Geomatiker in der Schweiz bekannt ist, da die FINELTRA-Transformation darauf basiert, die den Übergang von LV03 zu LV95 ermöglicht. Zudem kann diese Transformation sehr flexibel bei allen möglichen Punktkonfigurationen angewendet werden und ermöglicht die lokale Verdichtung ohne Auswirkungen auf die Punkte ausserhalb des betroffenen Dreiecks. Der Nachteil ist die Definition der Dreiecke, die aufgrund der Besonderheiten der offiziellen Vermessung nur bedingt automatisierbar ist.

Neben einer Interpolation auf einem unregelmässigen Gitter ist auch eine bilineare Interpolation auf einem regelmässigen Gitter denkbar, zumindest für die Bereitstellung des Geschwindigkeitsfelds. Das NTv2-Format ermöglicht es, Subregionen mit einer höheren Punktdicht zu definieren.

Die endgültige Entscheidung für den Interpolationsalgorithmus wird bei der Realisierung gefällt.





5. Geodatenmodelle

Dieses Kapitel soll die erforderlichen Anpassungen an die relevanten INTERLIS-Dateien und an die minimalen Geodatenmodelle zur Einführung des neuen Höhensystems aufzeigen. Zudem werden Empfehlungen für die Anpassung des Geodatenmodells der offiziellen Vermessung DMAV formuliert.

Die INTERLIS-Dateien, die sich mit Bezugssystemen und Koordinatensystemen befassen, sind im Anhang K des Handbuchs INTERLIS 2 eCH-0031 aufgeführt. Es handelt sich um die folgenden Dateien:

- *CoordSys.ili* (Modell des Bezugssystems)
- *MiniCoordSysData.xtf* (Beschreibung der Bezugssysteme)

Die Modelle müssen angepasst werden, um die Definitionen des neuen Systems widerzuspiegeln (s. Abschnitt 2.2). Dies betrifft insbesondere die Verbindung einer Höhenkoordinate mit ihrem Bezugsrahmen⁶ sowie die Möglichkeit, die Messepochen zu berücksichtigen.

Insbesondere erfolgt eine Anpassung des Basismoduls des Bundes für das minimale Geodatenmodell, das die Geometrien beschreibt:

- *CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili*

⁶ In Wirklichkeit beziehen sich die Höhen in der INTERLIS-Modellierung auf ein Koordinatensystem mit einer einzigen Achse, und es werden nicht direkt die Begriffe Bezugssystem oder Bezugsrahmen verwendet.



5.1. Definition des neuen Bezugssystems in INTERLIS 2

Das neue Höhenmodell kann als neue Klasse *GeoHeight* gemäss dem Bezugssystemmodell *CoordSys*, das unverändert bleibt, modelliert werden. Die erforderlichen Attribute für die Definition dieser Klasse *GeoHeight* umfassen die Art des Höhensystems, die Bezugshöhe sowie deren Beschreibung. Diese Klasse basiert auf einem Referenzellipsoid (Geoid) und einem Gravitationsmodell.

Um die Höhe mit ihrem Bezugsrahmen zu verbinden, muss dementsprechend z.B. die Datei *MiniCoordSys* mit den folgenden neuen Beschreibungen vervollständigt werden:

```
<GeoHeight ili:tid="BcoordSys.CHVRFXXX">
  <ili:Name>SwissVerticalReferenceFrameXXXX</ili:Name>
  <ili:Axis>
    <LengthAXIS>
      <ShortName>H</ShortName>
      <Description>Swiss Normal Altitude</Description>
    </LengthAXIS>
  </ili:Axis>
  <System>normal</System>
  <ReferenceHeight>0</ReferenceHeight>
  <ReferenceHeightDescr>XX reference points</ReferenceHeightDescr>
  <EllipsoidRef ili:ref="BcoordSys.GRS80"/>
  <GeoidRef ili:ref="BcoordSys.CHQGEOXXX"/>
  <GravityRef ili:ref="BcoordSys.CHGRAVXXX"/>
</GeoHeight>

<Ellipsoid ili:tid="BcoordSys.GRS80">
  <ili:Name>GRS80</ili:Name>
  <EllipsoidAlias>GRS 1980</EllipsoidAlias>
  <SemiMajorAxis>6378137</SemiMajorAxis>
  <InverseFlattening>298.2572221</InverseFlattening>
  <Remarks>Geodetic Reference System 1980</Remarks>
</Ellipsoid>

<GeoidModel ili:tid="BcoordSys.CHQGEOXXX">
  <ili:Name>SwissGeoidXXXX</ili:Name>
  <Definition>See new Swiss Geoid swisstopo</Definition>
</GeoidModel>

<GravityModel ili:tid="BcoordSys.CHGRAVXXX">
  <ili:Name>SwissGravityNetworkXXXX</ili:Name>
  <Definition>See documentation swisstopo Landesschwerenetz</Definition>
</GravityModel>
```

Abbildung 5-1: Beschreibung von CHVRFXXX (Datei MiniCoordSys.xtf)

Von daher wird für die völlig neuen INTERLIS-Modelle die Höhe wie folgt modelliert:

```
REFSYSTEM BASKET BcoordSys ~ CoordSys.CoordsysTopic
OBJECTS OF GeoHeight: CHVRFXXXX;

DOMAIN
Hoehe = COORD
  -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX[1]};
Hkoord = COORD
  2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
  1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
  -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX[1]},
ROTATION 2 -> 1;
```

Abbildung 5-2: Modellierung einer Höhe CHVRFxxxx



5.2. Anpassungen des Basismoduls des Bundes

Um das neue Höhensystem einzuführen, muss das Modul CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili⁷ verändert werden.

Dieses Modul umfasst die drei folgenden Modelle:

- *Geometry_V2*
- *GeometryCHLV03_V2*
- *GeometryCHLV95_V2*

Die Modelle *GeometryCHLV03_V2* und *GeometryCHLV95_V2* müssen wie folgt angepasst werden:

```
TYPE MODEL GeometryCHLV95_V2 (en)
  AT "https://models.geo.admin.ch/CH/" VERSION "2021-10-19" =

  IMPORTS Units;
  IMPORTS CoordSys;
  IMPORTS Geometry_V2;

  REFSYSTEM BASKET BcoordSys ~ CoordSys.CoordsysTopic
    OBJECTS OF GeoCartesian2D: CHLV95
    OBJECTS OF GeoHeight: CHVRFXXXX;

  DOMAIN
    !!@CRS=EPSG:2056
    Coord3 EXTENDS Geometry_V2.Coord3 = COORD
      2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
      1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
      -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX [1]},
      ROTATION 2 -> 1;

    !!@CRS=EPSG:2056
    MultiPoint3D EXTENDS Geometry_V2.MultiPoint3D = MULTICOORD
      2460000.000 .. 2870000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[1]},
      1045000.000 .. 1310000.000 [INTERLIS.m] {CHLV95[2]},
      -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX [1]},
      ROTATION 2 -> 1 ;
```

Abbildung 5-3: Empfehlungen für die Anpassung des Moduls CHBase_Part1_GEOMETRY_V2

5.3. Empfehlungen für die Berücksichtigung der Kinematik

Es gibt zwei unterschiedliche Szenarien, wie die Epochenverwaltung gelöst werden kann:

1. **Höhe ohne Angabe der Epoche:** In diesem Fall umfasst die Höhe keine Informationen zur Messepoche. Diese Höhe wird folglich als offizielle Höhe betrachtet, also als Höhe zur Referenzepoche des Bezugsrahmens.
2. **Höhe mit Angabe der Messepoche:** Die Höhe umfasst eine Angabe der Messepoche. In diesem Fall liegt die Höhe in der angegebenen Epoche vor. Um eine offizielle Höhe zu erhalten – also zur Referenzepoche des Bezugsrahmens – ist die Anwendung des kinematischen Modells erforderlich.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt, die Messepoche in Jahren auszudrücken.

```
UNIT
  Year [Y] EXTENDS INTERLIS.TIME;
```

⁷ https://models.geo.admin.ch/CH/CHBase_Part1_GEOMETRY_V2.ili



Die Modellierung der Messepoche kann mit einem neuen Bereich für die Messepoche realisiert werden, gemäss folgendem Beispiel:

```
DOMAIN
  Hoehe = COORD
    -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m] {CHVRFXXXX[1]};
  Epoch = 1582 .. 2999 [Y];
```

5.4. Empfehlungen für das Geodatenmodell der amtlichen Vermessung DMAV

Heute sind die Höhen der amtlichen Vermessung mit einem simplen Wert modelliert und nicht mit einem Bezugssystem assoziiert. Die Höhe wird im Modell *DMAVTYM_Geometrie_V1_0.ili* wie folgt definiert:

```
DOMAIN
  Hoehe = -200.000 .. 5000.000 [INTERLIS.m]
```

Wir empfehlen der amtlichen Vermessung:

- Die Angabe des Bezugsrahmens in der Modellbeschreibung (s. Abbildung 5-2: Modellierung einer Höhe CHVRF);
- Die Messepoche nicht zu modellieren und nur Koordinaten zur Referenzepoche zuzulassen.



6. Transformationskonzept der bestehenden Geodaten

Dieses Kapitel beschreibt die Höhentransformation von bestehenden Geodaten zwischen dem offiziellen Höhenbezugsrahmen LN02, dem strengen Höhenbezugsrahmen LHN95 und dem neuen Höhenbezugsrahmen CHVRFxxxx.

6.1. Transformationsalgorithmus

Der Transformationsalgorithmus ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Der zentrale Teil des Algorithmus ist die Transformation von LHN95 zu CHVRFxxxx. LHN95 wird als ausreichend kompatibel mit CHVRFxxxx angenommen, damit eine direkte mathematische Transformation mit einer ausreichenden Genauigkeit möglich ist, die durch eine ausreichende Anzahl Kontrollpunkte validiert wird. Diese Hypothese muss im Rahmen des «Proof of Concept» überprüft werden.

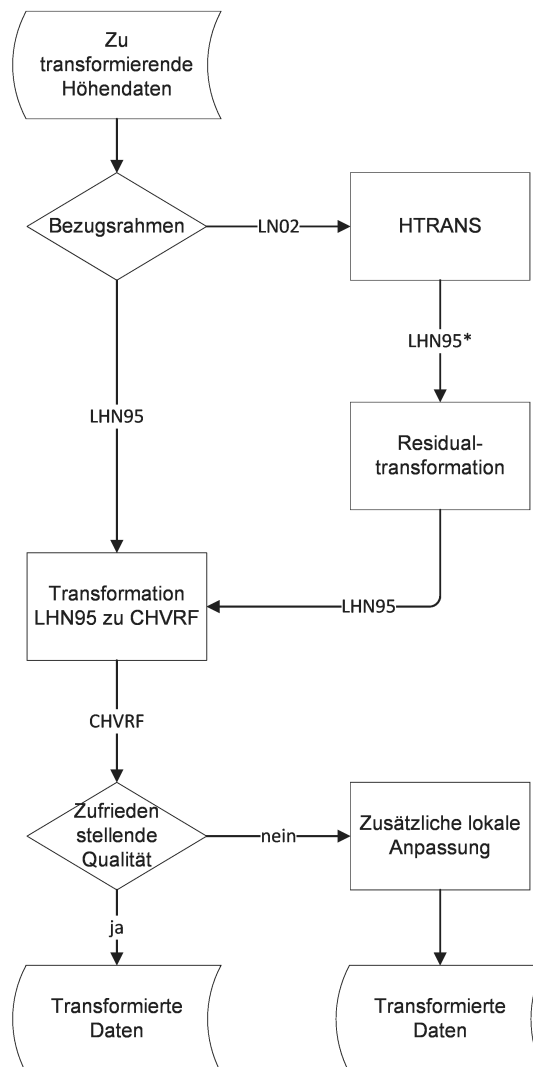


Abbildung 6-1: Höhentransformationsalgorithmus. LHN95* bezeichnet eine Näherung von LHN95 vor der Residualtransformation.



LN02-Höhendaten hingegen können nicht direkt mit ausreichender Genauigkeit mittels HTRANS nach CHVRFxxx transformiert werden. In diesem Fall muss HTRANS um eine Residualtransformation ergänzt werden.

6.2. Residualtransformation

Um die Höhengenaugkeit der bestehenden Geodaten im Bezugsrahmen LN02 beizubehalten und möglicherweise sogar zu verbessern ist eine zusätzliche Transformation erforderlich. HTRANS ist ausserhalb der Landesnivellementlinien tatsächlich nicht definiert. Die Ungenauigkeiten von LN02 sind ein weiterer limitierender Faktor. Die Restklaffen sind eine Funktion der folgenden Parameter:

- Art der Messung für die Höhenbestimmung (RTK-GNSS, geometrisches Nivellement, trigonometrisches Nivellement)
- Nivellierwege (für die nivellierten Punkte)
- Höhe der Anschlusspunkte
- Messepoche

Diese Faktoren sind grundsätzlich nicht bekannt. Restklaffen werden jedoch aufgrund von statischen GNSS-Messungen auf geeigneten Punkten mit einer bekannten LN02-Höhe bestimmt. Abbildung 6-2 stellt die Prozesse für die Berechnung von Restklaffen auf den Transformationsstützpunkten (TSP) dar.

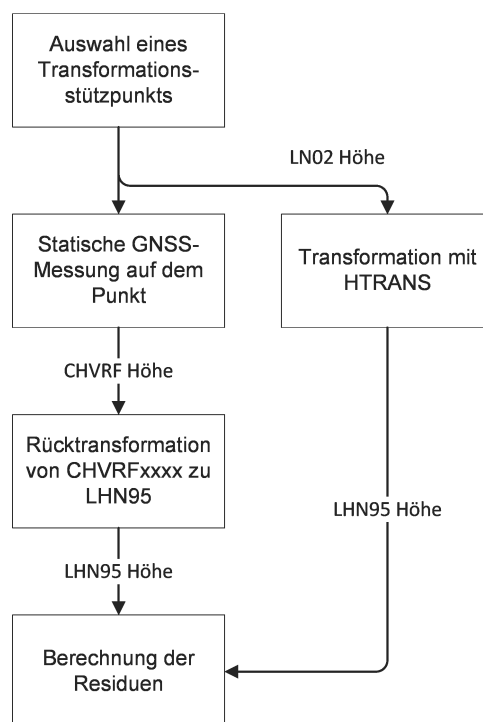


Abbildung 6-2: Prozess zur Festlegung von Transformationsstützpunkten (TSP).

Ein entscheidender Teil der Arbeit besteht also darin, die TSP zu identifizieren. Die kantonalen und kommunalen TSP vervollständigen die Transformation je nach lokalen Bedürfnissen und Ergebnissen der Transformationen.

Zudem werden für die Evaluation der Qualität der Transformationen systematisch Kontrollpunkte in ausreichender Anzahl bestimmt und mit den transformierten Höhen verglichen.



6.2.1. Interpolationsalgorithmus

Die Interpolationsmethode ist bei der Realisierung der Transformation zu definieren. Es sind mehrere Algorithmen denkbar (nicht abschliessende Liste):

- Transformation durch Dreiecksvermaschung (gleiche Art wie «FINELTRA», das für den Übergang von LV03 zu LV95 verwendet wird).
- Bilineare Interpolation auf einem regelmässigen Gitter mit Untergittern von höherer Dichte.

6.3. Umsetzung

Um die Umsetzung des neuen offiziellen Schweizer Höhensystems um das Jahr 2030 zu vereinfachen, werden den Nutzerinnen und Nutzern sowie der Öffentlichkeit ergonomische und leistungsfähige Transformationsdienste vorgängig zur Verfügung gestellt. Die Datenherrin oder der Datenherr ist für die Umsetzung verantwortlich, das heisst, für die Transformation der Geodaten in den neuen Höhenbezugsrahmen. Die transformierten Geodaten müssen den Terminologieanforderungen gerecht werden, die im Abschnitt «Definition» des vorliegenden Dokuments erläutert sind.

6.3.1. «Proof of Concept» mit den Kantonen

Um die Umsetzung des Transformationskonzepts der bestehenden Geodaten zu überprüfen, werden in einigen Gemeinden und mit unterschiedlichen Höhendaten rund vier Pilotprojekte durchgeführt. Die Projekte werden in Zusammenarbeit mit den Kantonen und unter der Leitung von swisstopo durchgeführt.

swisstopo wird bei den Kantonen eine Projektausschreibung lancieren, um das Pflichtenheft und die Ziele des Projekts zu klären. Nach der Durchführung der Projekte wird zu jedem Pilotprojekt ein Bericht verfasst; Damit soll das Transformations- und Realisierungskonzept gefestigt werden.

6.3.2. Verpflichtung zur Transformation der bestehenden Höhendaten

Mit dem Entscheid zur Einführung des neuen Schweizer Höhenbezugssystems und -rahmens wird die Transformation aller bestehenden Höhendaten in der Schweiz von LN02 zu CHVRFxxxx innerhalb einer festgelegten Frist obligatorisch.





7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Arbeitsgruppe empfiehlt, bis zum Jahr 2030 das neue Höhensystem CHVRS als offizielles Schweizer System einzuführen. Die CHVRS Höhen sind von geopotentiellen Koten abgeleitet, sind Normalhöhen und im Gezeitensystem «mean-tide» vorliegend. Der geometrische Bezugsrahmen für die Höhen ist CHTRS. Das Ellipsoid für die Berechnung des Normalschwerefelds ist GRS80. Um den langfristigen Fortbestand des Höhenrahmens zu garantieren, werden vertikale Geschwindigkeiten modelliert. Die offiziellen Höhen sind Höhen im geltenden Bezugsrahmen und zur Referenzeпоche. Bei Bedarf werden sie mithilfe des kinematischen Modells zur entsprechenden Epoche reduziert.

Das Realisierungskonzept des neuen Höhensystems basiert hauptsächlich auf einer kinematischen Ausgleichung relativer geopotentieller Koten aus schwerekorrigierten Nivellementmessungen im Landeshöhenetz. Die Arbeitsgruppe empfiehlt, die Datumsdefinition auf mehrere Fixpunkte zu stützen.

Eine strenge Transformation zwischen LHN95 und CHVRS wird berechnet. Die Punkte, zu denen keine bekannte Höhe in LHN95 vorliegt, müssen mithilfe der Residualtransformation transformiert werden. Damit diese Transformation berechnet werden kann, sind Verdichtungsmessungen durch statische GNSS unerlässlich. Der Interpolationsalgorithmus ist in der Realisierungsphase zu definieren.

Die Transformations- und Realisierungskonzepte werden mit «Proofs of Concept» in Zusammenarbeit mit einigen Kantonen verfeinert.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt, die Arbeiten fortzusetzen, insbesondere:

1. Evaluation und Tests von wissenschaftlicher Software, insbesondere für die Geoidbestimmung
2. Realisierung und Anpassungen von Software-Tools für die Transformation von Höhen verschiedener offizieller Geodaten mit Schätzung der Genauigkeit der transformierten Höhen
3. Vorgängige provisorische Realisierung des neuen Höhensystems mit Blick auf die «Proofs of Concept»
4. Realisierung von «Proofs of Concept», um die Umsetzung des Transformationskonzepts von bestehenden Höhendaten zu überprüfen
5. Ausarbeitung von detaillierten Realisierungs- und Kommunikationsplänen
6. Erstellung eines Finanzierungsplans



Bibliografie

Heiskanen WA, Moritz H. (1967). Physical geodesy. San Francisco, WH Freeman.

Marti U. (1997). Geoid der Schweiz 1997. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.

Moritz H. (1980). Geodetic reference system 1980. Bulletin géodésique, 54, 395-405. doi: 10.1007/BF02521480.

Schlatter A. (2007). Das neue Landeshoehennetz der Schweiz LHN95. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.





Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Relative vertikale Verschiebungen einer Auswahl von Fixpunkten des Landesnivellements Quelle: Schlatter (2007)	23
Abbildung 5-1: Beschreibung von CHVRFXXX (Datei MiniCoordSys.xtf)	26
Abbildung 5-2: Modellierung einer Höhe CHVRFxxxx	26
Abbildung 5-3: Empfehlungen für die Anpassung des Moduls CHBase_Part1_GEOMETRY_V2	27
Abbildung 6-1: Transformationsalgorithmus der Höhen.....	29
Abbildung 6-2: Prozess zur Festlegung von Transformationsstützpunkten (TSP)	30





Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Definitionen des neuen Höhensystems CHVRS.	12
Tabelle 3-1: Definition der zwei Höhenbezugsrahmen der neuen Landesvermessung 1995, CHVRFyy und LHN95.	15





Glossar

AGNES; Automatisches GNSS Netz Schweiz; Netzwerk permanenter GNSS-Stationen in der Schweiz.

Bezugsrahmen; Gesamtheit der Punkte und Ergebnisse, die es ermöglichen, sich anhand von Koordinaten auf der Erde und im Weltraum zu positionieren.

Bezugssystem; Gesamtheit der theoretischen Grundlagen, die zur Schaffung eines Bezugsrahmens erforderlich sind.

CH1903+; Offizielles Bezugssystem der Schweiz.

CHTRS; Swiss Terrestrial Reference System; Schweizerisches terrestrisches Bezugssystem.

CHVRFxxxx; Ein Bezugsrahmen, der mit CHVRS verbunden ist. xxxx steht für das Jahr, in dem der Rahmen definiert wurde.

CHVRFyy; Swiss Vertical Reference Frame yy (oder yy ist das Jahr des Rahmens). Bezeichnung für den globalen Höhenbezugsrahmen im Projekt LV95. Veraltet.

CHVRS; Neues Schweizer Höhensystem.

Dichtemodell oder Massenmodell; Modell des Untergrundes, das sowohl Informationen über die Geometrie als auch über die Dichte der Gesteine enthält.

DMAV; Datenmodell der amtlichen Vermessung; Zukünftiges Datenmodell der amtlichen Vermessung in der Schweiz.

ETRS89; European Terrestrial Reference Frame 1989; Europäisches Bezugssystem.

EVRS; European Vertical Reference System; Europäisches Höhenbezugssystem.

Geopotentielle Kote; Potentialdifferenz zwischen dem Geoid und dem betrachteten Punkt. Es handelt sich um eine Art Höhe, die strengen Höhen zugrunde liegt.

Gezeitsystem; Konventionen, die zur Berechnung der Gezeiten zur Reduktion der Beobachtungen verwendet werden.

GNSS; Global Navigation Satellite Systems; Bezeichnet die wichtigsten Satellitennavigationssysteme, nämlich GPS (USA), Galileo (Europäische Union), GLONASS (Russland) und Beidou (China).

GRS80; Geodetic Reference System of 1980; Referenzsystem und Referenzellipsoid von 1980.

Höhe; Normalhöhe, ellipsoidische Höhe, orthometrische Höhe, Gebrauchshöhe.

Höhenbezugsrahmen; Bezugsrahmen, der die Bestimmung von Höhen ermöglicht.

HTRANS; Transformation von Höhen zwischen den Bezugsrahmen LN02 und LHN95.

IAG; International Association of Geodesy; Internationale Vereinigung für Geodäsie.

IHRS; International Height Reference System; Internationales Höhenbezugssystem.

InSAR; Interferometric Synthetic Aperture Radar; Technik der Satellitenfernerkundung, mit der Veränderungen der Erdoberfläche im Millimeterbereich festgestellt werden können. In der Praxis leidet diese Technik unter vielen Einschränkungen und hat daher bislang nur einen auf bestimmte Anwendungen beschränkten Einsatz.

INTERLIS; In der Schweiz verwendete Geodatenmodellierungssprache.

Intra-frame Deformation; Verformungen innerhalb eines Rahmens. Bei rahmeninternen Verformungen muss die Transformation von einem Rahmen zu einem anderen ein kinematisches Modell beinhalten.

ITRS; International Terrestrial Reference System; Internationales Bezugssystem.

Kinematisch; eine Geschwindigkeit darstellend. Wenn die Geschwindigkeiten das Ergebnis einer physikalischen Modellierung sind, spricht man von Dynamik und nicht von Kinematik.



Kinematische Ausgleichung; Berechnung von Höhen unter Berücksichtigung der Vertikalbewegungen.

Lagebezugsrahmen; Bezugsrahmen, der die Bestimmung von Lagekoordinaten ermöglicht.

LHN95; Landeshöhennetz 1995. Gesamtheit der Fixpunkte, Messungen und Ergebnisse, die es ermöglichen, in der Schweiz eine orthometrische Höhe gemäss der gültigen Definition zu erhalten.

LN02; Offizielles Schweizer Höhenbezugsrahmen, basierend auf dem schweizerischen Nivellement von 1902.

Lotabweichung; Winkel zwischen der lokalen Lotrichtung und der Ellipsoidennormalen.

LV03; Offizieller Schweizer Lagebezugsrahmen bis 2016.

LV95; Offizieller Schweizer Lagebezugsrahmen seit 2016.

PPP; Precise Point Positioning; GNSS-Echtzeit-Positionierungsmethode mit einer Genauigkeit im Dezimeterbereich und dem Potenzial, eine Positionierung im Zentimeterbereich zu ermöglichen.

Proof of Concept; Machbarkeitsstudie, die vor einem Pilotprojekt durchgeführt wird.

REFRAME; Webdienst von swisstopo, der Zugriff auf die offiziellen Schweizer Transformationen bietet.

Residualtransformation; empirische Transformation, die darauf abzielt, die Unterschiede zwischen den transformierten Höhen und den gemessenen Höhen zu minimieren.

Restklaffen; Differenz zwischen einem gemessenen Wert und einem geschätzten Wert.

RTK; Real Time Kinematic; Kinematische GNSS-Messungen in Echtzeit mit Zentimetergenauigkeit.

Satellitengeodäsie oder weltraumgeodätische Verfahren; Allgemeiner Begriff, der alle Satellitensysteme umfasst, die für geodätische Messungen verwendet werden können, d. h. GNSS, VLBI, SLR und DORIS.

Schweizerische Geophysikalische Kommission; eine Kommission der Schweizerischen Akademie der Wissenschaften, die u. a. mit der Sammlung von gravimetrischen Daten in der Schweiz beauftragt ist.

Schweremessungen; Messungen der Erdanziehungskraft mit einem Gravimeter. Nützlich für die Bestimmung des Geoids.

UELN; United European Levelling Network; Europäisches Nivellementnetz.