

Bericht 8

1995

(Ausgabe Februar 2001)

Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95'

Teil 3

Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen

Dieter Schneider, Erich Gubler, Urs Marti und Werner Gurtner

Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95'

Teil 3

Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen

Dieter Schneider, Erich Gubler, Urs Marti und Werner Gurtner

Anhang:

- A1** Abkürzungen
- A2** Verwendete Bezeichnungen für Grössen des Bezugssystems und des Schwerefeldes
- A3** Zusammenfassung der Systemdefinitionen von LV95
- A4** Festlegung des Fundamentalpunktes Zimmerwald in CHTRS95 und CH1903+
- A5** Transformationsparameter zwischen CH1903+ und CHTRS95
- A6** Schweizerische Landesprojektion: Schiefachsige winkeltreue Zylinderprojektion

© 2001
Bundesamt für Landestopographie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia
Federal Office of Topography

Redaktion: A. Wiget
D. Schneider
Ch. Studer
Auflage: 750 Exemplare
Druck: BBL - EDMZ

Vorwort

Rechtzeitig mit der endgültigen Berechnung des GPS-Landesnetzes LV95 für die schweizerische Landesvermessung müssen auch die grundlegenden geodätischen Definitionen der terrestrischen Bezugssysteme bereitgestellt werden. Der vorliegende Bericht versucht, die aktuelle Problematik der Bezugssysteme und ihrer Realisierungen in Form von Bezugsrahmen zu erhellen und stellt die für LV95 gewählte Lösung vor.

Bei der Wahl des Bezugssystems geht es um eine Entscheidung von langfristiger Bedeutung für alle Vermessungen in der Schweiz. Der vorliegende Vorschlag für das Bezugssystem von LV95 und seine Realisierung durch einen Bezugsrahmen wurde von einem Fachausschuss des Bundesamtes für Landestopographie (L+T) unter Beizug von Dr. W. Gurtner (Astronomisches Institut der Universität Bern) sorgfältig erarbeitet und im April 1995 der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) zur Begutachtung vorgelegt. Eine Kurzfassung dieses Berichts wurde im Mai 1995 am EUREF-Symposium in Helsinki präsentiert.

Ein erster Entwurf dieses Berichts lag bereits im Juni 1995 vor. Dieser Text wurde bis Ende August 1995 den betroffenen Amtsstellen des Bundes und der Kantone sowie diversen anderen Fachstellen im Rahmen einer Vernehmlassung unterbreitet. In der Folge gingen viele Anregungen und Verbesserungsvorschläge ein, welche soweit möglich berücksichtigt wurden. Die Autoren danken allen Berufskollegen, welche sich bei diesen Vorbereitungsarbeiten beteiligt haben, herzlich für ihren Beitrag.

Am 16. April 1996 entschied sich die Geschäftsleitung der L+T, nach Absprache mit der V+D, für die Einführung des neuen Bezugsrahmens LV95 und die Festlegung des Nullpunktes des Koordinatenrahmens ('False northing': $N_0 = 1'200 \text{ km}$ / 'False easting': $E_0 = 2'600 \text{ km}$) für alle Bedürfnisse der Landesvermessung. Die Entwurfsversionen dieses Berichts enthielten provisorische Angaben über die Festlegung des neuen Höhensystems und des Höhenbezugsrahmens LHN95. Die Leitung des Bereichs Geodäsie und die Autoren hielten es für wichtig mit der definitiven Publikation dieses Berichtsteils 3 zuzuwarten, bis auch diese Festlegungen veröffentlicht werden konnten.

Da der Entscheid Auswirkungen auf alle Anwendungen der Landesvermessung und insbesondere auch auf die amtliche Vermessung haben wird, wurde der Entwurf dieses Textes auch den Mitgliedern der paritätischen Arbeitsgruppe "Amtliche Vermessung / Landesvermessung 95" (AV/LV95) der Eidg. Vermessungsdirektion (V+D) abgegeben. Diese Arbeitsgruppe hatte den Auftrag, die Konsequenzen einer Einführung des Bezugsrahmens 'LV95' in die amtliche Vermessung (AV) zu studieren und ein entsprechendes Konzept zu erarbeiten.

Leider ist die Materie dieses Berichts trotz allen Bemühungen um Klarheit und Transparenz auch für Fachleute, welche sich täglich mit Fragen der Landesvermessung und der Fixpunktnetze der AV befassen, nicht ohne intensives Studium verständlich. An den Anfang des Berichts wurde deshalb eine ausführliche Zusammenfassung ('Executive Summary') gestellt. Darin wurde versucht, die für den Benutzer wesentlichen Fragestellungen in den Vordergrund zu rücken.

Préface

Les définitions géodésiques fondamentales du nouveau système de référence terrestre doivent être formulées en même temps que le calcul définitif du réseau GPS MN95 de la mensuration nationale suisse. Ce rapport décrit une approche moderne des systèmes de référence et de leur réalisation sous la forme d'un cadre de référence, telle qu'elle a été conçue pour le réseau MN95.

Le choix du nouveau système de référence aura des conséquences durables pour toutes les opérations géodésiques en Suisse. La proposition du système de référence de MN95 et de sa réalisation dans un cadre de référence est le résultat de la collaboration entre un groupe de travail de l'Office fédéral de topographie (S+T) et le Dr W. Gurtner, de l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne. Cette proposition a fait l'objet d'une présentation à la Commission géodésique suisse (CGS) en avril 1995 et d'un bref exposé au symposium EUREF de mai 1995 à Helsinki.

Il existait une première version de ce rapport, en juin 1995 déjà, dont le texte a été mis en consultation auprès des services fédéraux, cantonaux et de diverses instances professionnelles. Il en est résulté de nombreuses propositions de modification et d'amélioration, qui ont été prises en compte dans toute la mesure du possible. Les auteurs remercient vivement tous ceux qui ont pris une part active à ces travaux préparatoires.

Le 16 juin 1996, le directoire du S+T, après consultation de la Direction fédérale des mensurations (D+M), décidait l'introduction du nouveau Cadre de référence MN95 et arrêta le choix du nouveau Repère fondamental du réseau de coordonnées ('False Northing': $N_0 = 1'200 \text{ km}$ / 'False Easting': $E_0 = 2'600 \text{ km}$) pour tous les besoins de la mensuration nationale. Des nouvelles versions de ce rapport contenaient des éléments provisoires relatifs à la définition du système et du cadre de référence altimétriques. La Direction du domaine *Géodésie* et les auteurs jugeaient en effet préférable d'attendre la publication de ce cahier n° 3, afin que les conclusions des travaux sur le nouveau Réseau altimétrique national (RAN95) y soient intégrées.

Comme les effets de ce choix s'exercent dans toutes les applications de la mensuration nationale et particulièrement dans celles de la mensuration officielle, une ébauche de ce rapport a été distribuée aux membres du groupe de travail paritaire "Mensuration officielle / Mensuration nationale 95" (MO/MN95) de la Direction fédérale des mensurations. Ce groupe de travail avait pour mission d'étudier les conséquences de l'introduction du cadre de référence MN95 dans la mensuration officielle (MO) et d'élaborer une stratégie adéquate pour cette introduction.

Malgré tous nos efforts de clarté et de transparence, la compréhension de ce rapport exige du temps et de l'effort, même pour des spécialistes en contact permanent avec les problèmes de mensuration nationale et les réseaux de points fixes. C'est pourquoi un résumé détaillé ('executive summary') figure en début de rapport, afin de mettre en évidence pour le lecteur les questions jugées essentielles.

Preface

In conjunction with final adjustments of the GPS control network (LV95) for the Swiss national survey, the basic geodetic definitions of the terrestrial reference system must also be formulated. In this report the relevant problems of reference systems and their realisation in the form of reference frames shall be discussed and the chosen solution for LV95 presented.

The choice of the reference system will have long-term consequences for all surveys in Switzerland. The present proposal for the reference system for LV95 and its realisation through a reference frame was carefully elaborated by a group of experts from the Swiss Federal Office of Topography (S+T) together with Prof. W. Gurtner (Astronomical Institute of the University of Bern). The report was presented to the Swiss Geodetic Commission (SGK) in April 1995 and a summary was presented at the EUREF Symposium in Helsinki in May 1995.

A first draft of this report had already been written in June 1995. By the end of August it had been distributed to various federal and cantonal offices as well as different groups of surveying specialists for their comments and opinions. The ensuing suggestions and ideas were taken into consideration whenever possible. The authors wish to thank all colleagues who participated in the preparation of this report.

The decision to introduce the new reference frame LV95 and to specify the point of origin for the reference frame ('false northing': $N_0 = 1'200 \text{ km}$ / 'false easting': $E_0 = 2'600 \text{ km}$) for all national surveying needs was made on April 16, 1996, by the directorate of the Federal Office of Topography after consultation with the Federal Directorate of Cadastral Surveying. The drafts of this report contained only temporary indications as to the specification of the new height system and the height reference frame LHN95. The head of the Geodesy Division and the authors felt that it was important to postpone the definite publication of this report until the final definitions were ready for publication.

Because this choice will affect all applications in national surveying and especially cadastral surveying, the draft of this report was also submitted to the members of the working group "cadastral surveying / national surveying 95" of the Federal Directorate of Cadastral Surveying. The objective of this working group was to study the consequences of introducing the reference frame 'LV95' for cadastral surveying and working out a relevant concept.

Despite all efforts to keep the contents of this report clear and transparent, it will nevertheless still be difficult to comprehend, even for those who are confronted with national surveying and control networks on a regular basis. Therefore, an "executive summary" appears at the beginning of the report in which the essential questions and problems are brought to attention.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort / Préface / Preface

Zusammenfassung / Résumé / Executive Summary

1	Einleitung.....	1
2	Globale terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen	1
2.1	Allgemeines	1
2.2	IERS Terrestrial Reference System (ITRS).....	1
2.3	European Terrestrial Reference System (ETRS89).....	1
2.4	Realisierung durch den European Terrestrial Reference Frame (ETRF89).....	2
2.5	Verdichteter Bezugsrahmen: European Reference Frame (EUREF89).....	3
2.6	Bedeutung der globalen Bezugssysteme für die Landesvermessung LV95	3
3	Lokale terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen	3
3.1	Allgemeines	3
3.2	Das Geodätische Datum CH1903 der bisherigen Landesvermessung LV03	3
3.3	Das Gebrauchshöhensystem des alten Landesnivellements LN02	5
3.4	Anforderungen an moderne lokal gelagerte Bezugssysteme.....	5
4	Konzept der Terrestrischen Bezugssysteme für LV95.....	6
4.1	Duale Systemwahl: global und lokal gelagerte Systeme	6
4.2	Anschluss an ETRS89.....	7
4.3	"Ideelle" und "reale" Fundamentalpunkte	8
4.4	Wahl des Höhensystems.....	14
4.5	Kinematische Modelle für LV95.....	19
4.6	Kartenprojektionen für LV95.....	19
5	Festlegung der Terrestrischen Bezugssysteme für LV95.....	20
5.1	Allgemeines zur Festlegung der Bezugssysteme.....	20
5.2	Festlegung des "global gelagerten" Bezugssystems CHTRS95	21
5.3	Festlegung des "lokal gelagerten" Bezugssystems CH1903+.....	22
5.4	Koordinatentransformation CHTRS95 $\leftrightarrow$ CH1903+.....	24
5.5	Festlegung der Höhenbezugssysteme von LV95.....	25
6	Global und lokal gelagerte Bezugsrahmen CHTRF95 und LV95.....	26
6.1	Realisierung des global gelagerten Bezugsrahmens CHTRF95	26
6.2	Kinematische Daten zu CHTRF95	27
6.3	Realisierung des lokal gelagerten Bezugsrahmens LV95.....	27
6.4	Anwendung der neuen Bezugsrahmen	27
6.5	Neues Landeshöhennetz LHN95	28
7	Übergänge zwischen den lokalen Bezugsrahmen.....	30
7.1	Bisherige Übergänge zwischen globalen und lokalen Bezugsrahmen	30
7.2	LV03 $\leftrightarrow$ LV95	31
7.3	LN02 $\leftrightarrow$ LHN95	31

Literatur

Anhang:

A1	Abkürzungen
A2	Verwendete Bezeichnungen für Grössen des Bezugssystems und des Schwerfeldes
A3	Zusammenfassung der Systemdefinitionen von LV95
A4	Festlegung des Fundamentalpunktes Zimmerwald in CHTRS95 und CH1903+
A5	Transformationsparameter zwischen CH1903+ und CHTRS95
A6	Schweizerische Landesprojektion: Schiefachsige winkeltreue Zylinderprojektion

Zusammenfassung

Unter der Leitung ihres Chefs, Dr. h.c. Leonz Held, erteilte die Eidg. Landestopographie (L+T) zu Beginn dieses Jahrhunderts zwei umfassende Forschungsaufträge im Zusammenhang mit der Neudefinition des geodätischen Bezugssystems als Grundlage für die Vermessungen in der Schweiz.

Dr. Jakob Hilfiker erarbeitete einen Vorschlag für ein neues Höhendatum der Schweiz, welcher mit der Publikation: "Untersuchungen über die Höhenverhältnisse der Schweiz" 1902 veröffentlicht wurde. Anhand eines Vergleiches der Höhensysteme der Nachbarländer schlug er vor, als Höhenbezug (Ausgangshorizont) den 'Repère Pierre du Niton' (Bronzeplatte von G.H. Dufour 1820 erstellt) auf einem erratischen Block im Hafen von Genf mit einem vom Mittelwasser des Mittelmeeres im Hafen von Marseille (Pegel) aus dem geometrischen Nivellement mit sphäroidischer Korrektur abgeleitet und auf den dm gerundeten Höhenwert von 373.6 m anzunehmen.

Gleichzeitig studierte Dr. h.c. Max Rosenmund die Frage nach der Einführung einer neuen schweizerischen Kartenprojektion für alle Vermessungen in der Schweiz. Seine Publikation: "Die Änderung des Projektionssystems der schweizerischen Landesvermessung" erschien 1903. Als Landeskartenprojektion wurde eine winkeltreue, schiefachsige Zylinderprojektion vorgeschlagen. Als Geodätisches Datum (Lagerung des Bezugsellipsoids) diente die aus den Arbeiten der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) mit dem Ellipsoid von Bessel und der alten Sternwarte in Bern (Schnittpunkt von Horizontal- und Zielachse des Passageinstruments) als Fundamentalpunkt und Nullpunkt des Landeskoordinatensystems übernommene Grundlage.

Die erwähnten Arbeiten legten das bisher gültige geodätische Bezugssystem für die Landesvermessung in der Schweiz fest. Mit der Realisierung der Grundlagennetze (Triangulation 1. bis 3. Ordnung und Landesnivellement) in den darauf folgenden Jahrzehnten wurden die Bezugsrahmen (von kleinen Ausnahmen abgesehen) überall durchgesetzt. Im vorliegenden Bericht werden das bisher gültige schweizerische Bezugssystem (Geodätisches Datum) mit "CH1903" und die Lage- und Höhenbezugsrahmen (offizieller Koordinatensatz der Landestriangulation bzw. Gebrauchshöhen des Landesnivellements) mit "LV03" bzw. "LN02" bezeichnet.

Die beschriebenen geodätischen Grundlagen ("CH1903" und die schiefachsige winkeltreue Zylinderprojektion) sind seit rund einem Jahrhundert im Gebrauch. Sowohl die Ellipsoidlagerung wie auch die Kartenprojektion haben sehr günstige Eigenschaften (z.B. kleine Abweichung Geoid - Ellipsoid und geringe Projektionsverzerrungen). Vermessungsfachleute aller Ausbildungsstufen sind mit dem Gebrauch dieses Systems und im Besonderen mit den Reduktionen der Messgrößen aufs Ellipsoid und ins Landeskoordinatensystem vertraut. Die nötigen Reduktionsformeln sind in vielen Rechenprogrammen integriert und erlauben den rationellen Umgang mit dem System.

Für die Vermessungen in der Schweiz gibt es kaum brauchbare Alternativen zu "CH1903" und der schiefachsigen Zylinderprojektion. Es ist offensichtlich, dass für die Belange der Amtlichen Vermessung (AV) das bestehende Bezugssystem und die Landeskartenprojektion wenn immer möglich beibehalten werden sollten. Falls eine Neudefinition des Systems notwendig wird, sollten die Veränderungen, zumindest für die Anwendungen in der AV, vernachlässigbar klein bleiben.

Für die Landesvermessung ist mit der Einführung der 'Space Geodesy' (insbesondere GPS) eine neue Ära angebrochen. Die Messmethoden von kontinentaler Reichweite ermöglichen die Verwendung von globalen Bezugssystemen und den Aufbau von weltweiten terrestrischen Netzen und Bezugsrahmen. Die wiederholten Präzisionsmessungen der modernen Geodäsie erlauben zudem die Untersuchung von tektonischen Bewegungen der obersten Erdkruste. Die Modellierung dieser Kinematik wird umkehrt zur wichtigen Voraussetzung für die optimale Ausschöpfung der Genauigkeit der Messmethoden. Es ist deshalb nicht erstaunlich, dass z.Z. in Europa (und weltweit) die meisten Landesvermessungen auf eine neue geodätische Basis gestellt werden.

Mit der Definition des *European Terrestrial Reference Systems 1989 (ETRS89)* hat die EUREF-Subkommission in Europa einen Standard geschaffen, der einen einheitlichen Bezug aller modernen Landesvermessungen auf dem Kontinent erlaubt. Durch diese Vereinheitlichung wird der Wunsch nach zentimetergenauen Übergängen zwischen den Bezugssystemen von Nachbarländern zur Wirklichkeit.

Die divergierenden Anforderungen, welche die wissenschaftliche Geodäsie und Landesvermessung einerseits und die AV andererseits stellen, führte zur Idee einer dualen Systemwahl.

Für die Bedürfnisse der Geodäsie und Landesvermessung sowie für die anforderungsreichen Anwendungen der Ingenieurvermessung (Grossprojekte wie BAHN2000 und AlpTransit) wird das global gelagerte, terrestrische Bezugssystem "CHTRS95" und als erste Realisierung sein Bezugsrahmen

"CHTRF95" eingeführt. Dieses System stützt sich auf "ETRS89" und umfasst auch ein kinematisches Modell. Die Positionen der geodätischen Punkte werden als zeitlich veränderlich und nicht mehr als statisch ("Fixpunkte") betrachtet. Die Transformation von CHTRF95-Koordinaten in den europäischen Koordinatenrahmen ist einfach und mit cm-Genauigkeit möglich. Das Bezugssystem CHTRF95 ist grundsätzlich dreidimensional-kartesisch und mit dem System WGS84 im Dezimeter- bis Meter-Bereich identisch.

Im Gegensatz dazu wird für die Belange der AV das bisherige Bezugssystem und das zugehörige Projektions- und -koordinatensystem LV03 faktisch beibehalten. Mit der neuen Bezeichnung "CH1903+" wird lediglich auf eine neue Festlegung des Fundamentalpunktes (realer Punkt in Zimmerwald an Stelle des heute nur noch ideellen Punktes bei der alten Sternwarte in Bern) hingewiesen. Diese Datumsänderung wurde so gewählt, dass sie für alle Anwendungen in der AV nicht bemerkbar ist. Als Realisierungen dieses Systems werden der neu berechnete Koordinatenrahmen "LV95" (GPS-Landesnetz) und die neuen streng zu berechnenden Höhen "LHN95" (neues Landeshöhennetz) betrachtet. Der Übergang von LV95- in CHTRF95-Koordinaten (und damit in den europäischen Bezugsrahmen und genähert ins System WGS84) ist mit einer klar definierten, einfachen mathematischen Transformation und mit Zentimetergenauigkeit möglich. Dabei werden sowohl der Massstab als auch die Orientierung, wie sie im GPS-Netz bestimmt wurden, beibehalten. Die Koordinatenunterschiede zwischen den Bezugsrahmen LV95 und LV03 variieren in Richtung und Betrag von 0.0 m in der Region Bern bis zu ca. 1.6 m im äussersten Südosten der Schweiz und sind hauptsächlich durch die Massstabsabweichung des alten Netzes verursacht.

Die Koordinaten der geodätischen Punkte im Bezugsrahmen LV95 werden für den Referenzzeitpunkt $t_0 = 1993.0$ berechnet und wie bisher in der AV üblich als statisch betrachtet. Die Bezeichnungen für die Koordinatenwerte im Bezugsrahmen LV95 (E: Ostwert, N: Nordwert, etc.) unterscheiden sich von den alten Bezeichnungen LV03 (y, x) deutlich. Zur Vermeidung von Verwechslungen mit LV03-Koordinaten wird zum Ostwert eine Konstante von 2'000'000 m, und zum Nordwert eine von 1'000'000 m addiert. Die Trennung der Bezugsrahmen in Lage (LV95) und Höhe (LHN95) soll grundsätzlich beibehalten werden.

Damit der neue Bezugsrahmen LV95 bei der AV sowie bei allen übrigen Vermessungs- und Navigationsanwendungen in der Schweiz optimal eingesetzt werden kann, muss eine einfache Möglichkeit zur Umwandlung der Koordinaten in den Rahmen LV03 und umgekehrt angeboten werden. Die L+T hat in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ Transformationsmethoden für den Übergang zwischen den Bezugsrahmen LV03 und LV95 entwickelt und entsprechende Software bereitgestellt. Das technische und organisatorische Vorgehen in der AV wurde in der Arbeitsgruppe "Amtliche Vermessung / Landesvermessung 95" der V+D erarbeitet. Die Verdichtung des GPS-Landesnetzes LV95 und der Bezug zur AV wird in einem weiteren Bericht dieser Serie behandelt werden.

Neben dem Lagegrundlagenetz wird auch das Landesnivellement z.Z. vollständig neu bearbeitet. Das bisherige Gebrauchshöhensystem (LN02) mit seinen Ursprüngen im 19. Jahrhundert wird durch ein potentialtheoretisch strenges Landeshöhennetz (LHN95) ersetzt. Das neue Netz entsteht durch die kinematische Neuausgleichung des Landesnivellements verstärkt durch Höhendifferenzen aus dem GPS-Landesnetz LV95. In Analogie zum Lagebezugssystem wird auch hier der neue Fundamentalpunkt in Zimmerwald an Stelle des Repère Pierre du Niton als realer Höhenbezugspunkt eingeführt, wobei auch diese Systemänderung für den Benutzer in der AV nicht bemerkbar sein wird. Die Einführung der neuen Höhen (LHN95) in der AV muss aus praktischen Gründen simultan mit der Umstellung der Lagekoordinaten erfolgen.

Résumé

Sous la direction du Dr. H. Leonz Held, l'Office fédéral de topographie (S+T) lança au début de ce siècle deux études approfondies sur une nouvelle définition du système de référence géodésique comme base fondamentale de la mensuration en Suisse.

Le Dr. Jakob Hilfiker proposa un nouveau système de référence altimétrique, suite à la publication de son étude en 1902 ("Untersuchungen über die Höhenverhältnisse der Schweiz"). S'appuyant sur une comparaison des systèmes d'altitude en vigueur dans les pays voisins, il recommanda d'adopter comme horizon de référence celui du "Repère Pierre du Niton" (repère en bronze scellé en 1820 par G.H. Dufour, matérialisé sur un bloc erratique dans le port de Genève), et de lui attribuer l'altitude de référence 373.6 m, dérivée du nivellement géométrique, avec correction sphérique, partant du niveau moyen de la mer Méditerranée au marégraphe de Marseille, arrondie au dm.

Simultanément, l'étude d'un nouveau Système de projection suisse adapté à tous les travaux de mensuration suisse fut menée par le Dr. Max Rosenmund. Sa publication ("Die Änderung des Projektionssystems der schweizerischen Landesvermessung"), parue en 1903, proposa la nouvelle définition, encore en vigueur aujourd'hui, d'une projection cylindrique conforme à axe oblique. Le datum géodésique (calage de l'ellipsoïde de référence, celui de Bessel) s'appuya sur les travaux astronomiques menés par la Commission géodésique suisse à l'ancien Observatoire de Berne, qui devenait à la fois point fondamental et origine du Système de coordonnées nationales.

Ces travaux déterminèrent le système de référence géodésique en vigueur jusqu'à ce jour pour la mensuration nationale suisse. La réalisation des réseaux nationaux de base (triangulations du 1er au 3e ordre et nivellement fédéral) occupa les décennies suivantes, avec à la clé un cadre de référence couvrant à quelques exceptions près l'ensemble du territoire suisse. Dans le présent rapport, le système de référence actuellement en vigueur (datum géodésique), respectivement le cadre de référence (coordonnées officielles de la triangulation nationale et altitudes usuelles du nivellement fédéral) sont désignés par les abréviations "CH1903", resp. "MN03" pour la planimétrie et "NF02" pour l'altimétrie.

Les bases géodésiques "CH1903" et la "projection cylindrique conforme à axe oblique", utilisées depuis près d'un siècle, présentent des avantages importants (par exemple de très faibles corrections dues à la différence entre ellipsoïde et géoïde, de faibles déformations dues à la projection). Les professionnels de la mensuration, à tous les niveaux, sont habitués à ce système, en particulier à la réduction des observations sur l'ellipsoïde et dans le système de coordonnées nationales. Les formules de réduction, intégrées dans de nombreux programmes informatiques, permettent par ailleurs un travail rationnel.

On trouverait difficilement une alternative valable à "CH1903" et à la projection cylindrique conforme à axe oblique actuelle. Le système de référence et le système de projection en vigueur seront donc conservés dans la mesure du possible pour les besoins de la mensuration officielle. Si une nouvelle définition du système s'avérait nécessaire, les modifications à faire intervenir dans les applications de la MO devraient être mineures, voire négligeables.

L'intégration de la géodésie satellitaire dans la mensuration a ouvert de nouvelles perspectives. Les méthodes de mesure à l'échelle continentale offrent la possibilité d'utiliser des systèmes de référence globaux et de réaliser des cadres de référence de grande étendue. Des mesures précises et répétées permettent de déterminer les mouvements de la partie supérieure de la croûte terrestre. La modélisation de cette cinématique donne en retour des informations précieuses sur l'optimum atteignable au moyen de ces méthodes de mesure. Il n'est donc pas surprenant que de nouvelles bases géodésiques soient actuellement mises en place dans la plupart des pays d'Europe et du monde.

Avec la définition du "European Terrestrial Reference System 1989" (ETRS89), la sous-commission EUREF a créé un standard en Europe, une référence à disposition des mensurations nationales modernes du continent. Grâce à cette uniformisation, le souhait d'une cohésion centimétrique entre systèmes de référence voisins devient enfin réalité.

Toutefois, des exigences inconciliables entre les domaines de la géodésie scientifique et de la mensuration nationale avec ceux de la mensuration officielle (MO) ont conduit à proposer un double système.

Le système de référence terrestre global "CHTRS95" et sa première réalisation comme cadre de référence "CHTRF95" seront disponibles pour les besoins de la géodésie et de la mensuration nationale comme pour les applications de mensuration technique et industrielle de grande envergure (RAIL2000, AlpTransit). Ce système s'appuie sur "ETRS89" et inclut un modèle cinématique. La position des

repères géodésiques évoluera en fonction du temps et ne pourra plus être considérée comme statique ("points fixes"). La transformation de coordonnées *CHTRF95* dans les cadres de référence européens est facile et peut atteindre une précision centimétrique. Le système de référence *CHTRS95* est de conception tridimensionnelle au sens strict et est identique au Système *WGS84*, au niveau du mètre, voire du décimètre.

Par contre, le système de coordonnées nationales *MN03* et le système de projection qui lui est associé seront pratiquement conservés pour les besoins de la mensuration officielle. Sous la nouvelle désignation *CH1903+*, il sera simplement fait allusion à la matérialisation d'un nouveau point fondamental à Zimmerwald, en remplacement du repère devenu fictif de l'Ancien Observatoire de Berne. Ce changement de définition n'engendre pas de conséquences tangibles pour les applications de la MO. Ce système de coordonnées sera concrétisé par le nouveau cadre de référence planimétrique récemment calculé *MN95* (réseau national GPS) et par les altitudes du nouveau réseau altimétrique national (*RAN95*), qui doivent encore faire l'objet d'une compensation rigoureuse. La transformation des coordonnées *MN95* en *CHTRF95* (ainsi que dans le cadre de référence européen et de manière approchée dans *WGS84*) est rendue possible par un modèle mathématique simple et clairement défini, permettant une précision centimétrique. Les différences de coordonnées entre *MN95* et *MN03* varient de 0.0 m dans la région de Berne jusqu'à 1.6 m à l'extrémité sud-est de la Suisse. Elles sont dues essentiellement aux distorsions d'échelle de l'ancien réseau.

Les coordonnées des points géodésiques dans le cadre de référence *MN95* seront calculées pour l'époque de référence $t_0 = 1993.0$ et considérées comme statiques, comme par le passé. Les coordonnées dans le cadre de référence *MN95* (E pour l'axe Est, N pour l'axe Nord) se distinguent clairement de celles de l'ancienne référence *MN03* (y, x). Pour éviter les confusions entre les deux systèmes, des constantes de 2'000'000 m et de 1'000'000 m seront ajoutées aux valeurs E et N, respectivement. La séparation entre planimétrie (*MN95*) et altimétrie (*RAN95*) sera conservée.

Pour que le nouveau cadre de référence *MN95* puisse être utilisé de façon optimale dans les diverses tâches de mensuration et de navigation en Suisse (en particulier la MO), un moyen simple de transformer les coordonnées de *MN95* vers *MN03* et réciproquement, devra être mis au point. Le S+T, en collaboration avec l'Institut de géodésie et photogrammétrie de l'EPFZ a développé les logiciels nécessaires à ces transformations. Les procédures techniques et administratives à mettre en œuvre pour les applications de la MO ont été étudiées par le groupe de travail "Mensuration officielle / Mensuration nationale 95" de la D+M. La densification du réseau national GPS-MN95 et sa relation avec la MO seront traitées dans un prochain rapport de cette série.

Comme le réseau de base planimétrique, le réseau de nivellement fédéral subit actuellement une profonde modernisation. L'actuel système d'altitudes usuelles *NF02*, dont les origines remontent au XIXe siècle sera remplacé par un réseau national d'altitudes basé sur un concept rigoureux (*RAN95*). Le nouveau réseau résultera d'une nouvelle compensation cinématique du nivellement national, renforcée par les différences d'altitudes issues du réseau national GPS-MN95. L'horizon fondamental du Repère Pierre du Niton sera remplacé par l'altitude du point fondamental de Zimmerwald, désormais point fondamental effectif pour la planimétrie comme pour l'altimétrie. Pour les utilisateurs de la MO, les conséquences de ces modifications ne se feront pas sentir. Pour des raisons pratiques, les nouvelles altitudes (*RAN95*) seront introduites pour la MO en même temps que la transformation des coordonnées planimétriques.

Executive Summary

At the beginning of this century, Dr. h.c. Leonz Held, director of the Swiss Federal Office of Topography (S+T), initiated two research projects concerning a new definition of the Swiss geodetic reference system for all surveys in Switzerland.

Dr. Jakob Hilfiker elaborated a proposal for a new Swiss height datum ("Untersuchungen über die Höhenverhältnisse der Schweiz"), which was published in 1902. Based on a comparison of the height systems of neighbouring countries, he suggested introducing the "Repère Pierre du Niton", a bench mark on a large erratic rock in the harbour of Geneva (established by G.H. Dufour 1820), with a height of 373.6 m (rounded to the dm) obtained from geometric levelling with spheroidal corrections, and derived from the mean sea level (tide gauge) of Marseilles as reference.

At the same time and in context with the horizontal datum, Dr. h.c. Max Rosenmund investigated the possibilities for introducing a new Swiss map projection for all surveys in Switzerland. His title: "Die Änderung des Projektionssystems der schweizerischen Landesvermessung" was published 1903. With this proposal, the conformal, oblique cylindrical projection was adopted as the Swiss national projection. With the old observatory of Bern as fundamental point (simultaneously the origin of the Swiss national coordinate system), the reference ellipsoid (Bessel 1841) was implicitly defined.

On the basis of this work, the hitherto valid geodetic reference system for Swiss national surveying was established. With the realisation of the national geodetic control (1st to 3rd order triangulation and national levelling networks) in the following years, the reference frame was consequently carried through almost everywhere. In this report, the old and still valid geodetic reference system (geodetic datum) is designated by "CH1903", whereas the reference frames in position and height (official coordinate set of the national triangulation and official heights of the national levelling network) are designated by "LV03" and "LN02" respectively.

The described geodetic reference ("CH1903" and the national map projection) has been in use now for an entire century. The positioning of the ellipsoid as well as the map projection do have very favourable properties (e.g. small differences between the geoid and ellipsoid; slight distortions due to the projection). Surveyors in all stages of education are used to the system and know in particular the procedures for reducing the observables onto the ellipsoid and into the mapping plane. The necessary routines for reductions are introduced in many computer programs and allow an economic use of the system.

There is almost no alternative to "CH1903" and the oblique cylindrical projection for surveying in Switzerland. It is obvious that as far as cadastral surveying is concerned, the old reference system and the national map projection should be kept the same. If a new definition is necessary, the consequences for cadastral applications should at least be negligibly small.

With the introduction of space geodetic methods (e.g. GPS) in national surveying, a new era has begun. The application of global terrestrial reference systems and the establishment of world-wide geodetic networks and reference frames are made feasible by the new geodetic techniques with continental reach. In addition, repeated geodetic measurements of high precision allow the investigation of tectonic movements of the uppermost crust. The resulting kinematic models on the other hand are an important supposition for the optimal use of the method's potential. It is therefore not astonishing that at the moment most national surveys in Europe (and world-wide) are being re-established on a new geodetic reference base.

With the definition of the *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)*, the EUREF sub-commission created a standard which allows a uniform reference for all modern national surveys on the continent. With this standardisation, the wish for an accuracy on the cm level for transforming from one reference system into another has become reality.

The different demands made by the scientific geodetic community and national surveying on the one hand and by cadastral surveying on the other hand lead to the idea of a dual choice of systems.

The globally positioned terrestrial reference system "CHTRS95" and, as a first realisation its reference frame "CHTRF95", will be introduced for the needs of geodesy and national surveying in general, as well as for technical applications in engineering surveying such as RAIL2000 or AlpTransit. This system is based on "ETRS89" and also contains a kinematic model. The positions of the geodetic control points are regarded as variable in time rather than static or fixed points. The transformation of CHTRF95 coordinates into the European reference frame is easy and an accuracy on the cm level is

possible. The reference system *CHTRS95* is basically three-dimensional and consistent with the system *WGS84* on the dm or 1 metre level.

For cadastral surveying, however, the current reference frame (*LV03*) with its national coordinates will practically remain in use. The new description "*CH1903+*" indicates the new definition of the fundamental point (real point in Zimmerwald instead of the ideal point at the old observatory in Bern). This new definition, however, was chosen in such a manner so as not to be noticeable in the applications of cadastral surveying. The newly adjusted coordinate frame "*LV95*" (national GPS network) and the new heights "*LHN95*" (to be calculated by a rigorous readjustment in a new national height network) will be considered as the realisation of this system. The transition from *LV95* coordinates to those of *CHTRF95* will be possible by a clearly defined, easy transformation with an accuracy on the cm level. The scale as well as the orientation, determined in the GPS network, will be retained. The coordinate differences between *LV95* and *LV03* vary from 0.0 m in the region of Bern up to around 1.6 m in the extreme Southeast of Switzerland. This is caused mainly by the scale error of the old network.

The coordinates of the geodetic points in the reference frame *LV95* will be calculated for the reference epoch $t_0 = 1993.0$ and will remain static for cadastral surveying. There is a distinct difference in the designation for the coordinate values in the reference frame *LV95* (E = easting, N = northing) and the old values of *LV03* (y, x). In order to avoid any confusion between the *LV95* and *LV03* coordinates, a constant of 2,000,000 m will be added to the E value and one of 1,000,000 m to the N value. The basic separation between the coordinates (*LV95*) and the heights (*LHN95*) of the reference frame will be kept by.

In order to be able to use the new reference frame *LV95* in all kinds of surveying (especially cadastral surveying) in Switzerland, there must be an easy method available for transforming the coordinates from one system into the other. The Federal Office of Topography together with the Institute for Geodesy and Photogrammetry at the Federal Institute of Technology in Zurich have developed transformation methods for the transition between the reference frame *LV03* and *LV95* and have made the relevant software available. The technical and organisational procedure for cadastral surveying was studied by the working group "cadastral survey / national survey *LV95*" of the Federal Directorate of Cadastral Surveying. The densification of the national GPS network *LV95* and its reference to cadastral surveying will be treated in a further report of this series.

In addition to the new national survey network, the national levelling network is also being completely revised at this time. The official height system (*LN02*) which originated in the 19th century will be replaced by a rigorous height system (*LHN95*). The new network will be a kinematic re-adjustment of the national levelling and enhanced by height measurements from the national GPS network *LV95*. Analogous to the reference system *CHTRS95*, the new real fundamental point will be Zimmerwald instead of the Repère Pierre du Niton, whereby this new definition will not have any consequences in cadastral surveying. For practical reasons, the introduction of the new height system (*LHN95*) in cadastral surveying must be done simultaneously with the transition to the new coordinates.

1 Einleitung

In der vorliegenden Publikation wird der Begriff *Bezugssystem* (*Reference System*) für die theoretische Definition eines Koordinatensystems im Raum und der Begriff *Bezugsrahmen* (*Reference Frame*) für die Realisierung eines solchen Systems (aus Beobachtungen ermittelte Koordinatensätze von geodätischen Netzen und zugehörige Parametersätze für deren Transformation) gebraucht. Der konsequenten Unterscheidung und der richtigen Anwendung der Begriffe wird besondere Beachtung geschenkt. Die Namen von Bezugssystemen bzw. -rahmen und ihre Abkürzungen sind im Folgenden in *Kursivschrift* angegeben.

Unter dem früher oft verwendeten Begriff *Geodätisches Datum* wird die Festlegung der Grösse und der räumlichen Lagerung eines Rotationsellipsoids als Bezugsfläche verstanden. Das Terrestrische Bezugssystem ist somit ein Oberbegriff zum Geodätischen Datum.

Beim Aufbau der *neuen Landesvermessung LV95¹* der Schweiz wird eine strenge Definition eines terrestrischen Bezugssystems vorausgesetzt. Dieses System muss durch reguläre (mathematische) Transformationen zum weltweit gültigen globalen System (*Conventional Terrestrial System*) einerseits und zum bestehenden lokalen geodätischen Datum *CH1903* andererseits in Beziehung gebracht werden können.

Zudem sind Wege und Verfahren festzulegen, wie dieses System (und die Übergänge zu anderen Bezugssystemen) in der Form von terrestrischen Bezugsrahmen realisiert werden sollen.

2 Globale terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen

2.1 Allgemeines

Globale terrestrische Bezugssysteme sind geozentrische kartesische Koordinatensysteme mit dem Ursprung im Massenschwerpunkt (M) der Erde. Als 'Conventional Terrestrial System' (CTS) wird jenes System bezeichnet, dessen Ursprung in M liegt, dessen Z-Achse durch den "Nordpol" ('Conventional International Origin': CIO) geht, dessen XZ-Ebene den mittleren Nullpunkt im Observatorium in Greenwich enthält und dessen Y-Achse die Definition zu einem rechtshändigen Achsensystem ergänzt [Vaníček und Krakiwsky, 1982].

Globale terrestrische Bezugsrahmen sind Realisierungen von solchen Systemen in der Form von Koordinatensätzen (und evtl. Geschwindigkeitssätzen) von terrestrischen Punkten, welche aus der Ausgleichung von Beobachtungen der heutigen Geodäsie entstehen.

2.2 IERS Terrestrial Reference System (ITRS)

Der *International Earth Rotation Service* (IERS) hat das weltweit gültige *IERS Terrestrial Reference System* (ITRS) für die geometrische Beschreibung der mit Hilfe der 'Space Geodesy' (SLR, VLBI, DORIS und GPS) bestimmten Stationskoordinaten definiert. ITRS gilt heute als das ausgezeichnete 'Conventional Terrestrial System' schlechthin und der darin definierte *IERS Terrestrial Reference Frame* (ITRF) findet weltweit Anwendung und wird aufgrund regelmässiger SLR- und VLBI-Beobachtungen unterhalten [Boucher and Altamimi, 1989]. Seit 1994 werden auch in weltumspannenden Beobachtungsnetzen permanent durchgeführte GPS-Beobachtungen verwendet, welche im Rahmen des *International GPS Service for Geodynamics* (IGS) regelmässig ausgewertet werden [Beutler et al., 1994]. Bis 1997 wurde die Realisierung des ITRS aufgrund neuer Daten und neuer Stationen jährlich nachgeführt (Bezugsrahmen ITRF88 - ITRF97). In Zukunft soll die Nachführung erst nach längeren Zeitintervallen durchgeführt werden. Als Bezugsellipsoid zum ITRS wird das GRS80-Ellipsoid (Geodetic Reference System 1980) verwendet [Moritz, 1984].

2.3 European Terrestrial Reference System (ETRS89)

Die *Subcommission for the European Reference Frame* (EUREF) der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) hat 1990 in Florenz [Gubler et al., 1992a] und 1992 in Bern [Gubler et al., 1992b] Be-

¹ Die Bezeichnung "LV95" wird sowohl für das **Projekt Neue Landesvermessung 1995**, das **GPS-Landesnetz 95** sowie für den **Bezugsrahmen LV95** verwendet.

schlüsse zur Definition eines *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)* gefasst. Dieses Bezugssystem stützt sich auf das *IERS Terrestrial Reference System (ITRS)*.

Im *ITRS* erfahren alle Stationskoordinaten in Nord- und Mitteleuropa Veränderungen in der Größenordnung von 3 cm/Jahr, wegen tektonischen Bewegungen der eurasischen Platte im globalen Bezugssystem (*Abbildung 2.3-1*). Zeitlich stark variierende Koordinaten sind aber für den praktischen Gebrauch in der Vermessung nicht geeignet. Deshalb wurde *ETRS89* zur Epoche 1989.0 auf dem stabilen Teil der eurasischen Platte festgehalten. Zu diesem (und nur zu diesem) Zeitpunkt sind die Koordinaten aller Punkte mit jenen im *ITRS* (Realisierung *ITRF89*, Epoche 1988.0 und hochgerechnet mit dem AM0-2 Geschwindigkeitsmodell auf Epoche 1989.0; siehe nächster Abschnitt) identisch. *ETRS89* stimmt zudem im Meterbereich mit dem hauptsächlich in der Navigation mit GPS verwendeten *World Geodetic System WGS84* überein, welches seit 1996 als identisch zum *ITRS* betrachtet werden kann.

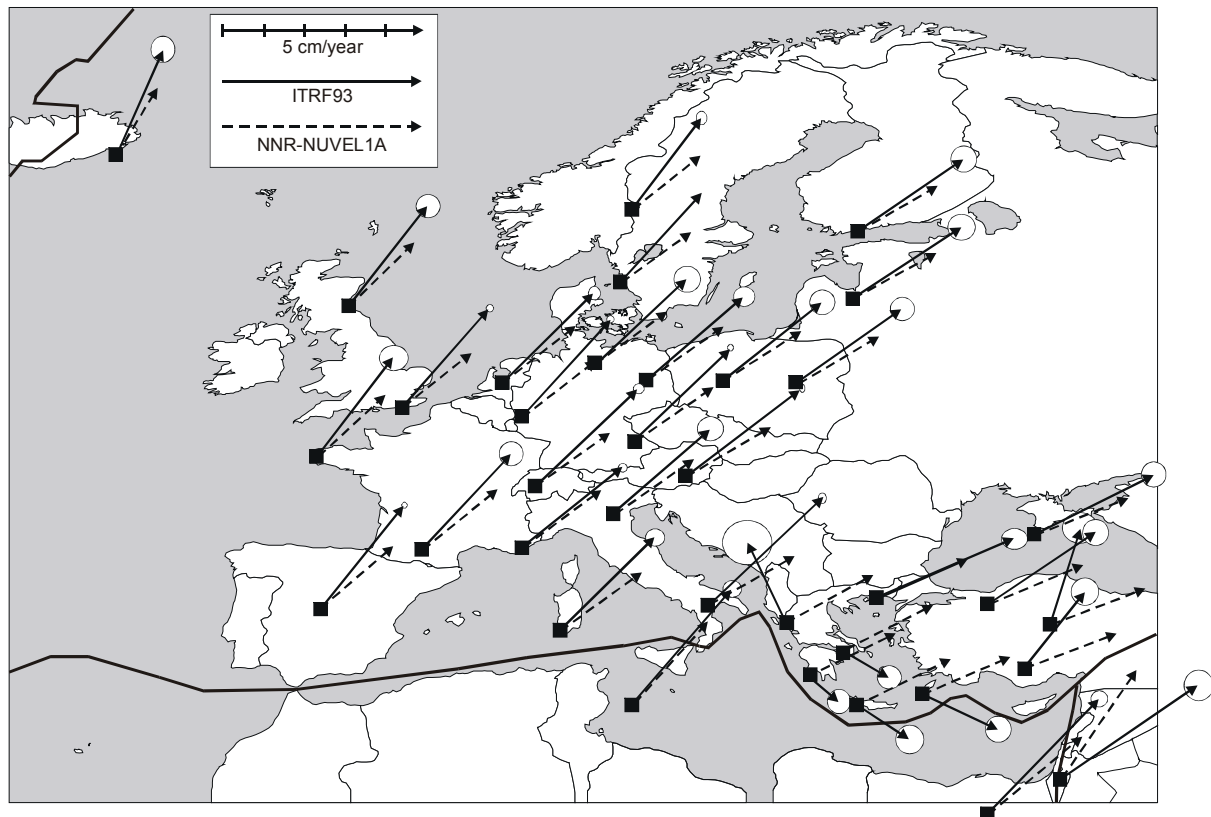


Abbildung 2.3-1: Koordinatenänderungen (Geschwindigkeit) europäischer Referenzstationen im System ITRS [Boucher, 1995]

2.4 Realisierung durch den European Terrestrial Reference Frame (ETRF89)

Der ursprüngliche Bezugsrahmen *ETRF89* beruht auf den *ITRF89*-Koordinaten von 21 europäischen SLR- und VLBI-Stationen (sog. 'fiducial stations') [Boucher and Altamimi, 1992].

Für die europäischen SLR- und VLBI-Stationen (IERS-fiducials) liegen inzwischen bereits neue Datensätze vor, welche unter den Bezeichnungen *ETRF90*, *ETRF91*, *ETRF92*, *ETRF93* etc. [Boucher and Altamimi, 1995] als verbesserte Realisierungen von *ETRS89* zu betrachten sind.

Für die Transformation auf der Zeitachse werden kinematische Modelle der globalen Plattentektonik verwendet. Für *ETRF89* wird die Bewegung des stabilen Teils der eurasischen Platte mit Hilfe des globalen kinematischen Modells AM0-2 [Minster and Jordan, 1978] bezogen auf die Epoche 1989.0 berechnet. AM0-2 beschreibt für diesen Plattenteil lediglich eine räumliche Drehbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit von ca. 1/1000 Bogensekunden/Jahr (oder 0.25°/Mio. Jahre) um eine durch den Massenschwerpunkt der Erde gelegte Achse. Diese Bewegung (in NE-Richtung und in der oben genannten Größenordnung von 3 cm/Jahr) hat nur vernachlässigbar kleine Veränderungen der ellipsoidischen Höhen zur Folge. Die dominante "Festkörper-Bewegung" des starren Teils der eurasischen tektonischen Platte lässt sich damit als horizontale Verschiebung modellieren. Diese kinemati-

schen Modelle werden laufend verbessert (seit 1991 wird z.B. das Modell NNR-NUVEL1, seit 1993 NNR-NUVEL1A verwendet).

Diese einfachen kinematischen Modelle können aber die komplexeren Verschiebungs- und Verzerrungsfelder (z.B. jene im östlichen Mittelmeerraum) sicher nicht mehr mit genügender Genauigkeit approximieren. Der dreidimensionale Charakter und die Komplexität der zu erwartenden Bewegungen im Alpengebiet ruft auch für diesen Raum nach vollständigeren Modellen.

2.5 Verdichteter Bezugsrahmen: European Reference Frame (EUREF89)

Mit *EUREF89* wurde 1989 eine erste Realisierung von *ETRS89* in einer für den Anschluss der verschiedenen europäischen Landesvermessungen genügenden Dichte (93 Stationen) und Verteilung in Westeuropa geschaffen. Bei der Ausgleichung des kontinentalen GPS-Netzes wurden die *ETRF89*-Koordinaten der 'fiducials' als Festwerte verwendet. Mit *EUREF89* wurde zwar ein Meilenstein der geodätischen Kooperation in Europa gesetzt, in Bezug auf die Genauigkeit des Koordinatensatzes konnten aber damals die potentiellen Möglichkeiten von GPS bei Weitem noch nicht ausgeschöpft werden [Gurtner et al., 1992].

2.6 Bedeutung der globalen Bezugssysteme für die Landesvermessung LV95

Eine moderne Landesvermessung muss in ein globales geodätisches Bezugssystem eingebunden werden. Nur damit wird es möglich sein, raumbezogene Daten, welche z.B. in Geographischen Informationssystemen (GIS) gespeichert sind, über alle Grenzen hinweg auszutauschen. Zudem können so die modernen Navigationsverfahren und die Methoden der modernen 'Space Geodesy' ohne Einschränkungen genutzt werden.

Genau zu diesem Zweck hat die *IAG-Subcommission for the European Reference Frame (EUREF)* das neue europäische Bezugssystem *ETRS89* festgelegt und in Form des GPS-Netzes *EUREF* mit den entsprechenden Bezugsrahmen *ETRFxx* realisiert.

3 Lokale terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen

3.1 Allgemeines

Die klassischen Mittel der Geodäsie erlaubten bis vor wenigen Jahrzehnten die Verwendung des Konzepts der globalen Bezugssysteme in den Landesvermessungen nicht. Stattdessen wurden mit der Festlegung von geodätischen Datumparametern in einem (oder in mehreren) Fundamentalpunkten lokale Bezugssysteme definiert. Die Methoden der modernen Geodäsie erlauben die Festlegung von lokalen 3D-Bezugssystemen, welche ihrerseits mit globalen Bezugssystemen verbunden sind.

Die Koordinatensätze der geodätischen Fixpunkte, welche durch die Messung und Ausgleichung der geodätischen Grundlagennetze entstanden, bilden die lokalen terrestrischen Bezugsrahmen als Realisierungen dieser Systeme.

3.2 Das Geodätische Datum CH1903 der bisherigen Landesvermessung LV03

Das bisherige *Schweizerische Geodätische Datum CH1903*¹ [Rosenmund, 1903] und die auf dem zugehörigen Bessel-Ellipsoid definierte *Schweizerische Kartenprojektion* bzw. das Landeskoordinatensystem (schiefwinklige, winkeltreue Zylinderprojektion mit Fundamentalpunkt P_0 in Bern) haben sich bei allen praktischen Vermessungen und besonders in der Amtlichen Vermessung [Matthias et al., 1980] gut bewährt (*Anhang A6*). Sowohl die Geoidundulationen (N) wie auch die Lotabweichungen (ξ , η) bleiben im Bereich der Schweiz innerhalb geringer Beträge ($|N| < 5 \text{ m}$; $|\xi| < 100 \text{ cc}^2$; $|\eta| < 100 \text{ cc}^2$). Zudem sind die Reduktionen der geodätischen Messgrößen aufs Ellipsoid und die Verzerrungen in der Kartenprojektion (Längenverzerrung und Flächenverzerrung) einfach berechenbar und bleiben innerhalb vertretbarer Größenordnung, so dass sie bei einfachen Problemstellungen in erster Näherung vernachlässigt oder evtl. näherungsweise berücksichtigt werden können (z.B. Reduktion auf die Kugel). Die Längenverzerrung (Massstabsverzerrung) m nimmt zum Beispiel Beträge von 0 bis +190 ppm an [Bolliger, 1967]. Bei der Reduktion einer gemessenen Strecke in die Projektionsebene ist

¹ Die in jüngerer Zeit eingeführte Bezeichnung *Schweizerisches Geodätisches Datum CH1903* geht auf die Publikation von M. Rosenmund [1903] zum Schweizerischen Projektionssystem zurück.

² $100 \text{ cc} = 10 \text{ mgon}$

zudem zu beachten, dass der Anteil der Reduktion auf Meereshöhe immer negative Grössen annimmt. Damit wird je nach Höhenlage der Messstrecke ein Teil der Projektionsverzerrung wieder kompensiert.

Im Gegensatz zum lokalen geodätischen Datum CH1903 und der Schweizerischen Kartenprojektion ist bei der Verwendung von globalen Bezugssystemen und weltweit gültigen Kartenprojektionen (z.B. UTM) in der Schweiz mit kaum vernachlässigbaren Geoidundulationen in der Grössenordnung von 50 m und mit grösseren Längenverzerrungen (z.B. UTM: $-400 < m < +250$ ppm) zu rechnen.

Für praktisch alle Vermessungen in der Schweiz und insbesondere für die amtliche Vermessung (AV) sollte deshalb das bisherige *Schweizerische Geodätische Datum CH1903* mit dem Bessel-Ellipsoid und der darauf definierten *Schweizerischen Kartenprojektion* bzw. dem Landeskoordinatensystem als lokales Bezugssystem beibehalten oder für die praktische Vermessung nur unmerklich verändert werden.

Im bisherigen *Schweizerischen Geodätischen Datum CH1903* [Schürer, 1990] galten die in Tabelle 3.2-1 zusammengestellten Festlegungen:

Schweizerisches Geodätisches Datum CH1903	
a) Bezugsellipsoid von Bessel:	$a = 6\,377\,397.155\text{ m}$ $f = 1/299.15281285$ (oder $e^2 = 0.006674372231$)
b) Fundamentalpunkt P_0: (alte Sternwarte Bern)	$\lambda_0 = 7^\circ\,26'\,22.50''$ $\varphi_0 = 46^\circ\,57'\,08.66''$ $\xi_0 = 0$ (in P_0) $\eta_0 = 0$ (in P_0)
c) Ellipsoidlagerung: (S_0 : Schwerzenbach, ZH)	$N_0 = 0$ (in S_0 : $y = 691'971\text{ m}$, $x = 248'240\text{ m}$) (entspricht in $P_0 \sim 0.50\text{ m}$)
d) Koordinatenursprung (in P_0): (Schweiz. Kartenprojektion)	$y_0 = 600'000.000\,0\text{ m}$ $x_0 = 200'000.000\,0\text{ m}$

Tabelle 3.2-1: Festlegung des bisherigen Schweizerischen Geodätischen Datums CH1903

Bemerkungen zu Tabelle 3.2-1:

- zu a)** Die Ellipsoiddimensionen von Bessel (1841) wurden bei der Ausgleichung des Dreiecksnetzes der Triangulation der SGK (Mitteleuropäische Gradmessung) 1882-1890 erstmals verwendet [Zölly, 1948].
- zu b)** Die Orientierung des Ellipsoids in P_0 wurde durch Festlegung der astronomischen Beobachtungswerte Φ und Λ [Schürer, 1990] und durch Gleichsetzung der astronomischen und geodätischen Längen und Breiten ($\varphi_0 = \Phi_0$, $\lambda_0 = \Lambda_0$) implizit festgelegt.
- zu c)** Im Rahmen der Arbeiten der SGK (Triangulation (1854-1879) und Nivellement de Précision 1864-1891) wurde die Koinzidenz des Ellipsoids mit dem Geoid in P_0 vorausgesetzt. Im Zusammenhang mit den ersten Arbeiten der SGK zur Bestimmung eines Geoidmodells in der Schweiz (Astronomische Nivellements im Meridian des Gotthards 1916-18 und im Parallelkreis von Zürich 1934-36 sowie im Parallelkreis von Locarno 1939 und im Meridian von Lugano 1947-48 wurde die Höhenlagerung des Ellipsoids mit $N_0 = 0$ in S_0 angenommen (s. Kapitel 4.3 und Abbildung 4.3-7). Diese Festlegung wurde von Gurtner [1978] übernommen.
- zu d)** P_0 wurde ursprünglich als Nullpunkt des schweizerischen Koordinatensystems bezeichnet (mit $x_0 = y_0 = 0\text{ m}$) und damit die sog. "zivilen" schweizerischen Koordinaten festgelegt [Rosenmund, 1903]. In den Landeskarten wurden 1918 für P_0 die Werte: $y_0 = 600\text{ km}$ (false easting) und $x_0 = 200\text{ km}$ (false northing) und damit die sog. "Militärkoordinaten" eingeführt, um Verwechslungen der Werte zu vermeiden. Seit den Sechzigerjahren haben sich diese Koordinaten zuerst in der Landesvermessung und schliesslich auch in der amtlichen Vermessung konsequent durchgesetzt [Oettli, 1986].

Die mathematischen Grundlagen der Schweizerischen Kartenprojektion und die Formeln für die Umrechnung von lokalen geodätischen Koordinaten (geod. Längen und Breiten) in Schweizerische Landeskoordinaten sind vollständigshalber im *Anhang A6* zusammengestellt.

3.3 Das Gebrauchshöhensystem des alten Landesnivellements LN02

Die Schweiz verwendet als eines der letzten Länder in Europa noch immer ein Gebrauchshöhensystem, bei welchem keine Schwerereduktionen an den nivellierten Höhendifferenzen angebracht werden. Die "historischen" Gründe für die Beibehaltung dieses Relikts aus dem letzten Jahrhundert sind in [Schneider, 1993] dargelegt [Zölly, 1948].

Für das bisherige Höhensystem LN02 galten die Festlegungen in Tabelle 3.3-1.

Gebrauchshöhensystem des Schweizerischen Landesnivellements LN02	
a) Ausgangshorizont: (Repère Pierre du Niton, Genf)	RPN = 373.6 m
b) Schwerereduktion:	keine (Gebrauchshöhen)
c) Geschwindigkeitsfeld:	keines

Tabelle 3.3-1: Festlegungen des bisherigen schweizerischen Gebrauchshöhensystems LN02

Bemerkungen zu Tabelle 3.3-1:

- zu a) Die Festlegung des sog. *Neuen Horizontes* erfolgte 1902. Grundlage bildete die "Untersuchung der Höhenverhältnisse der Schweiz im Anschluss an den Meereshorizont" [Hilfiker, 1902]. Darin wurde nach Vergleichen mit italienischen, österreichischen und deutschen Pegelanschlüssen folgende Festlegung gewählt (Zitat): "Als Ausgangshorizont des schweizerischen Höhennetzes wird das Mittelwasser des mittelländischen Meeres im Hafen von Marseille eingeführt. Demgemäss wird die absolute Höhe von Pierre du Niton auf 373.6 m festgesetzt." (vgl. Abbildung 4.3-6)
- zu b) Eine Ausgleichung der 18 Hauptpolygone des Landesnivellements nach kleinsten Quadraten erfolgte 1944 [Schürer, 1944]; die Resultate fanden aber keine Anwendung beim offiziellen Landesnivellement. Im Rahmen der Arbeiten für das *Unified European Levelling Network (UELN)* wurden seit den Fünfzigerjahren den neu gemessenen Linien entlang systematisch Schwere-messungen erfasst (vgl. Abbildung 4.4-3). Strenge Ausgleichungen von geopotentiellen Differenzen wurden in der Folge durchgeführt. Diese Ergebnisse fanden aber beim offiziellen Landesnivellement LN02 keine Anwendung. Da die Gebrauchshöhen (LN02) als Anschlusswerte für die trigonometrischen Höhennetze (Triangulation 4. Ord.) verwendet wurden und bei deren Berechnung die Berücksichtigung der Lotabweichungen unterblieb, sind die trigonometrisch bestimmten Höhen der TP ebenfalls als Gebrauchshöhen zu betrachten.
- zu c) Untersuchungen über vertikale Bewegungen der obersten Kruste wurden seit den Fünfzigerjahren durchgeführt [Gubler et al., 1984] und ein Geschwindigkeitsfeld berechnet. Diese Resultate fanden in den Kreisen der Erdwissenschaftler grosses Interesse. In verschiedenen Gebieten hat die L+T Detailstudien über die rezenten Krustenbewegungen durchgeführt und publiziert (vgl. Abbildung 4.3-8). Die Resultate fanden aber beim bisherigen offiziellen Landesnivellement LN02 keine Anwendung.

3.4 Anforderungen an moderne lokal gelagerte Bezugssysteme

An das ideale, lokal gelagerte Bezugssystem für eine zeitgemässe Landesvermessung in Europa sind die folgenden Anforderungen zu stellen [Gubler und Schneider, 1994]:

- Bezug zum *ETRS89* und damit zum 'Conventional Terrestrial System' *ITRS* durch eine klar definierte, einfache mathematische Transformation.
- Keine Abweichung bezüglich des Massstabs (d.h. kompatibel mit der Meterdefinition) und möglichst geringe Abweichung bezüglich der Orientierung des Systems gegenüber dem *ETRS89* (d.h. ~ Parallelität der Koordinatenachsen).
- Ergänzung durch ein potentialtheoretisch strenges Höhensystem (orthometrische Höhen oder Normalhöhen) und ein entsprechendes Modell der Bezugsfläche (Geoid- oder Quasigeoidmodell).
- Ergänzung des Systems durch ein geeignetes dreidimensionales kinematisches Modell (z.B. Geschwindigkeitsfeld), das die zeitliche Variation der geometrischen Konfiguration der geodätischen Punkte im Raum beschreibt.

Der letztgenannte Punkt wird auch unter dem Stichwort *Konzept der vierdimensionalen Geodäsie* beschrieben. Danach umfasst das Bezugssystem neben den Koordinatenachsen auch die "Domäne Zeit" (Zeitachse). Zur kinematischen Beschreibung eines geometrischen Punktes dienen dabei neben den 3 Koordinaten X, Y, Z (Ortsvektor) z.B. deren zeitliche Ableitungen $\dot{X} = \delta X / \delta t$, $\dot{Y} = \delta Y / \delta t$, $\dot{Z} = \delta Z / \delta t$ (Geschwindigkeitsvektor). Dabei ist zu beachten, dass sich mit den geodätischen Methoden der relativen Positionierung keine absoluten Koordinaten und Geschwindigkeiten sondern nur relative Werte bezogen auf einen festzulegenden Referenzpunkt bestimmen lassen. Ein anderer Ansatz zur Beschreibung der zeitlichen Variation der geometrischen Konstellation der geodätischen Punkte auf der physikalischen Erdkruste liefert die Theorie der Verzerrungsanalyse (Straintensor) [Schneider, 1982].

Mit der Einführung kinematischer Konzepte in die neue Landesvermessung werden die seit langem postulierten Forderungen der Geodäsie erfüllt [Matthias, 1977].

4 Konzept der Terrestrischen Bezugssysteme für LV95

4.1 Duale Systemwahl: global und lokal gelagerte Systeme

Um den Übergang vom globalen (europäischen) ins lokale (nationale) Bezugssystem (und umgekehrt) jederzeit mit fast beliebiger Rechenschärfe realisieren zu können, wird für LV95 eine Doppeldefinition eines global gelagerten (*CHTRS95*) sowie eines lokal gelagerten Bezugssystems (*CH1903+*) vorgeschlagen. Der Übergang vom einen ins andere System kann durch eine klar definierte, einfache mathematische Transformation mit beliebiger Schärfe realisiert werden (s. *Abbildung 4.1-1*). Die Parameter für diese Transformation werden "per Definition" festgelegt und sind damit nicht von gemessenen Grössen (Koordinaten) abhängig. Die einmal festgelegten Transformationsparameter bleiben immer gültig.

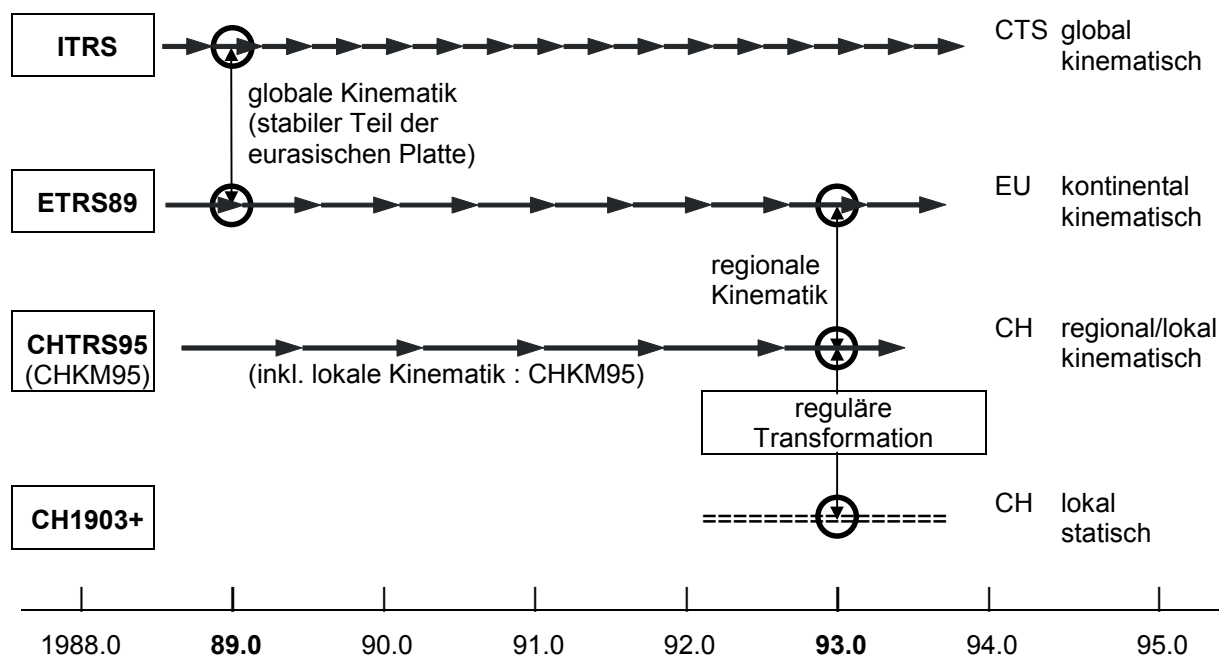


Abbildung 4.1-1: Verknüpfung der globalen und lokalen Bezugssysteme

Als *global gelagertes Bezugssystem* käme aus Gründen der Kompatibilität mit anderen Landesvermessungen in Europa und in Übereinstimmung mit den Empfehlungen der EUREF-Subkommission eigentlich nur *ETRS89* in Frage. Zur Anpassung an die komplexe tektonische Situation im Alpengebiet wird aber trotzdem noch ein eigenes schweizerisches System *CHTRS95* eingeführt, welches mit *ETRS89* in erster Näherung und zur Zeit t_0 streng identisch ist. Die kleinen Abweichungen (wenige mm pro Jahr) zwischen *ETRS89* und *CHTRS95* werden durch das zum System gehörende kinematische Modell *CHKM95* (s. 4.5) beschrieben. Damit wird es möglich sein, nötigenfalls für die Schweiz ein besonderes (sozusagen massgeschneidertes) Kinematikmodell zu verwenden, welches sich von jenem in *ETRS89* unterscheidet. Das System *CHTRS95* soll in Zukunft für alle Aufgaben der Landesvermessung sowie auch für Grundlagenvermessungen grosser Ingenieurprojekte in der Schweiz verwendet werden.

Aus praktischen Gründen (s. 3.2) wird als **lokal gelagertes Bezugssystem** der Schweiz das bisherige System (Geodätische Datum) **CH1903** grundsätzlich beibehalten. Die grundlegenden Definitionen (Festlegung der Datumparameter in den Fundamentalpunkten) werden lediglich den modernen Anforderungen angepasst (s. 4.3) und zur Vermeidung von Verwechslungen eine neue Bezeichnung: **CH1903+** eingeführt. Man könnte daher auch von einer "Erneuerung" von **CH1903** sprechen. Die Koordinaten im lokal gelagerten System **CH1903+** sind als statische Werte, bezogen auf die Epoche $t_0 = 1993.0$ zu betrachten. Die Punkte erhalten in diesem System keine Individualgeschwindigkeiten.

Zur Vermeidung von Verwechslungen wird bei Koordinatenangaben die konsequente Verwendung der in Tabelle 4.1-1 angegebenen Bezeichnungen vorgeschlagen.

Bezeichnungen und Schreibweisen	Bisher	Erneuert
System:	CH1903	CH1903+
Rahmen:	LV03	LV95
Geodätische (ellipsoidische) Koordinaten: (Beispiele)	$\lambda_{03} = 7^\circ 26' 22.50''$ $\phi_{03} = 46^\circ 57' 08.66''$	$\lambda_{95} = 7^\circ 27' 58.413\ 62''$ $\phi_{95} = 46^\circ 52' 42.267\ 55''$
Schweiz. Landeskordinaten (Kartenprojektion) (Beispiele):	$y = 604\ 693.58\ \text{m}$ $x = 203\ 237.83\ \text{m}$	$E = 2\ 604\ 694.125\ 3\ \text{m}$ $N = 1\ 203\ 238.026\ 8\ \text{m}$

Tabelle 4.1-1: Bezeichnungen und "Nullpunkte" bei den Bezugssystemen CH1903 und CH1903+

Bei den neuen **LV95-Koordinaten** werden für die Koordinaten des Nullpunktes jeweils 2'600'000 m ('false easting') bzw. 1'200'000 m ('false northing') angenommen, um Verwechslungen mit LV03-Werten möglichst zu vermeiden. Diese Wahl wurde zu Beginn des Jahres 1996 nach eingehender Vernehmlassung bei den zivilen und militärischen Benützern der Landeskarten und der raumbezogenen Daten (GIS) in der Schweiz und nach Absprache mit der V+D durch die Geschäftsleitung L+T getroffen. Der Eindeutigkeitsbereich der Koordinaten wird damit weit über den Bereich der neuen Landeskarte 1:1 Mio. hinaus erweitert. Der Kartenrahmen bleibt im ersten Quadranten des Koordinatensystems, wodurch negative Koordinatenwerte in diesem Bereich ausgeschlossen sind. Verwechslungen sowohl zwischen LV03- und LV95-Koordinaten wie auch zwischen deren y- und x- bzw. E- und N-Werten können wirkungsvoll vermieden werden. Die vielen Benützer der Landeskarten und der raumbezogenen Daten (GIS), welche Koordinaten mit Metergenauigkeit verwenden, werden durch die Umstellung von LV03 auf LV95 kaum tangiert. Durch Abspalten der vordersten Stelle bei den E- und N-Werten erhalten sie ihre "altgewohnten Landeskordinaten".

Das Festhalten am bisherigen Datum und die Wahl der Nullpunktswerte des LV95-Koordinatensystems haben zudem den Vorteil, dass die Formeln der bisherigen Landeskartenprojektion (schiefschüssige Zylinderprojektion mit Berührungskreis durch den Fundamentalpunkt P_0 in Bern) sowie die in der Vermessung gebräuchlichen Rechenformeln für die Reduktion der Beobachtungen auf das Ellipsoid und in die Projektionsebene weiterhin verwendet werden können (wobei bei den E- und N-Werten der LV95-Koordinaten jeweils 2'000 km bzw. 1'000 km subtrahiert werden müssen). Die Verzerrungen, Lotabweichungen und Geoidhöhen bleiben klein.

4.2 Anschluss an ETRS89

Seit 1992 beteiligt sich die L+T im Rahmen ihrer Arbeiten für LV95 am Betrieb der Satelliten-Beobachtungsstation (Geostation) Zimmerwald des Astronomischen Instituts der Universität Bern (AIUB). Schon seit den Siebzigerjahren hat sich diese Station an internationalen SLR-Messprogrammen (z.B. MERIT, Crustal Dynamics Project, International Earth Rotation Service etc.) beteiligt. Die Station ist daher inzwischen mit Zentimetergenauigkeit sowohl im **ETRS89** wie auch im **ITRS** eingebunden und als 'realer' Fundamentalpunkt für LV95 prädestiniert.

Ein globales kinematisches Plattenmodell kann die Bewegung der Geostation Zimmerwald im **ITRS** nur grob beschreiben. Aus den SLR- und ab 1992 auch aus den GPS-Beobachtungsreihen von Zimmerwald sollte es hingegen nach einigen Jahren möglich sein, eine genauere Schätzung des Geschwindigkeitsvektors als Grundlage für ein regionales / lokales kinematisches Modell **CHKM95** zu berechnen. Dieses Modell enthält primär den 3D-Geschwindigkeitsvektor des Referenzpunktes Z_0 der Geostation Zimmerwald im **ETRS89** sowie evtl. Geschwindigkeiten weiterer EUREF-Punkte, welche im **ITRS** bekannt sind. Es soll aber später zu einem differenzierteren Geschwindigkeitsmodell für alle

LV95-Punkte ausgebaut werden (s. 4.5). Die Koordinaten der LV95-Stationen könnten damit für ein kurzes Zeitintervall näherungsweise als konstant, über einen längeren Zeitraum (Jahrzehnte) hingegen als zeitabhängig betrachtet werden. Zusätzlich zu den Koordinaten entsteht dabei ein relatives Geschwindigkeitsfeld (im *CHTRS95*), das für spezielle Präzisionsanwendungen (z.B. für Tunnelvermessungen) und für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet werden kann. Das kinematische Modell ist zudem eine wesentliche Voraussetzung für die gemeinsame Ausgleichung von geodätischen Beobachtungen aus verschiedenen Epochen.

Eine weitere Anschlussmöglichkeit an *ETRS89* besteht durch die optimale Verknüpfung des GPS-Landesnetzes LV95 mit den 5 EUREF-Stationen im Gebiet oder in nächster Umgebung der Schweiz.

Wir weisen an dieser Stelle schon vorgreifend darauf hin, dass man bei der Realisierung und Lagerung von LV95 von dem zu diesem Zeitpunkt deutlich überlegenen Bezugsrahmen *ITRF93* ausgegangen ist (s. 5.2, 6.1, *Anhang A3*, *Anhang A4.1*) und dass die Transformation vom *ITRS* ins *ETRS89* mit den Formeln nach [Boucher and Altamimi, 1995] realisiert wird.



Abbildung 4.2-1: Verbindung des GPS-Netzes LV95 mit den 'ITRS fiducial stations' und mit dem europäischen Netz EUREF

4.3 "Ideelle" und "reale" Fundamentalpunkte

Der Fundamentalpunkt der bisherigen schweizerischen Landesvermessung hat eine lange und bewegte Geschichte [Oettli, 1986; Wolf, 1879]. Schon 1812 wurde von französischen Ingenieuren auf dem Schanzenhügel über der Stadt Bern eine bescheidene Sternwarte errichtet. Diese wurde 1821 von Trechsel durch ein kleines, achteckiges Observatorium (*Abbildung 4.3-1*) ersetzt. Dufour wählte diesen Punkt als Fundamentalpunkt für seine Landesvermessung und sein Kartenwerk. Beim Bau des Physikalischen Institutes der Universität Bern im Jahr 1876 wurde das alte Observatorium entfernt. Die Lage des alten Meridianinstruments (1822-1876) wurde durch eine Marmorplatte im Untergeschoss des Neubaus versichert. Mit der Errichtung des heutigen Institutes für exakte Wissenschaften (1. Etappe 1962) wurde an der Stelle der alten Sternwarte ein Gedenkstein errichtet. Dieser musste schlussendlich bei der Realisierung der 2. Bauetappe in einen Lichtschacht verlegt werden, wo er noch heute erhalten ist (*Abbildung 4.3-2*).



Abbildung 4.3-1: Alte Sternwarte Bern (1821-1876): Fundamentalpunkt des bisherigen Bezugssystems CH1903

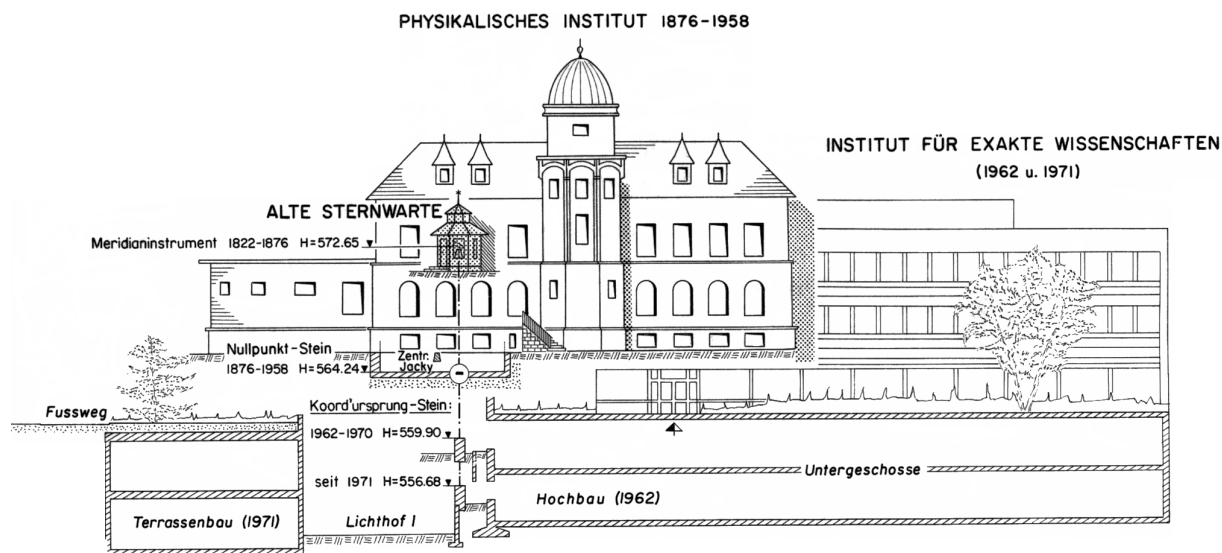


Abbildung 4.3-2: Schema [Oettli, 1986] der baugeschichtlichen Entwicklung der alten Sternwarte Bern (Fundamentalpunkt der Schweizerischen Landesvermessung, CH1903)

Dieser heute vorhandene Punkt hat allenfalls noch den Wert eines "Denkmals" (Abbildung 4.3-3) für die alten Landesvermessungen, da er für Anschlussmessungen im Rahmen einer neuen Landesvermessung praktisch nicht mehr zu gebrauchen ist und zudem die Stabilität seiner Versicherung nicht über jeden Zweifel erhaben ist. Man könnte deshalb allenfalls von einem "ideellen Fundamentalpunkt" an der Stelle der ehemaligen Sternwarte Bern sprechen.

Durch die grosse Bedeutung der Satellitenmessverfahren für die Geodäsie ist mit der Geostation in Zimmerwald faktisch ein neuer Fundamentalpunkt (Z_0) für die moderne Landesvermessung entstanden. Dieser neue Fundamentalpunkt erlaubt den direkten Anschluss der schweizerischen Landesvermessung an globale Bezugssysteme mit allen z.Z. verfügbaren geodätischen Messverfahren. Er wird in der Folge deshalb als realer Fundamentalpunkt Z_0 bezeichnet.



Abbildung 4.3-3: "Gedenkstein" für den alten Fundamentalpunkt (CH1903)



Abbildung 4.3-4: Geostation Zimmerwald (neues SLR-Teleskop ZIMLAT 1996)

Als konkrete Realisierung des Fundamentalpunktes Z_0 wird der 1988 durch die L+T versicherte Kappenbolzen im Fundament des GPS-Mastes (Abbildung 4.3-5) für die Permanentstation vorgeschlagen. Ein lokales geodätisches Netz (Triangulation und Nivellement) verbindet die verschiedenen Fixpunkte, Antennenstandorte und die Achsenschnittpunkte der SLR-Teleskope (altes Teleskop, DOMES-Nummer 14001S001 und neues Teleskop ZIMLAT, DOMES-Nummer 14001S007) untereinander. Alle Grössen, welche die neuen geodätischen Bezugssysteme *CHTRS95* und *CH1903+* festlegen, sollen auf den Fundamentalpunkt Zimmerwald (Z_0) bezogen werden.



Abbildung 4.3-5: GPS-Mast in Zimmerwald mit Bolzen Z_0 im Fundamentsockel

Das bisherige lokale Bezugssystem der Schweizerischen Landesvermessung bediente sich mehrerer geodätischer Referenzpunkte. Während für die klassische Definition des geodätischen Datums (*CH1903*) die alte Sternwarte Bern als Fundamentalpunkt (P_0) diente, wurde für das Höhendatum des Landesnivellements (*LN02*) der Bezugspunkt Repère Pierre du Niton (RPN) im Seebecken von Genf gewählt (Abbildung 4.3-6).



Abbildung 4.3-6: Höhenbezugspunkt des Landesnivellements (*LN02*): Repère Pierre du Niton (RPN)

Neben diesen beiden "expliziten Fundamentalpunkten" der Landesvermessung LV03 bzw. LN02 entstanden im Laufe der Zeit weitere geodätische Festlegungen und Bezugspunkte, welche ursprünglich rein wissenschaftlichen Zwecken dienten, heute aber als wichtige geodätische Basispunkte dienen.

Mit den ersten Arbeiten zur Bestimmung eines Geoidmodells in der Schweiz durch astronomische Nivellements im Meridian des Gotthards 1917-18 und auf dem Parallel durch Zürich 1934-36 der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) entstand ein Bedürfnis zur Festlegung des Geoidabstands in einem wohldefinierten Punkt. Es war nahe liegend, damals gerade den Schnittpunkt der beiden Geoidprofile in Schwerzenbach (ZH) als weiteren "ideellen Fundamentalpunkt" (S_0) (Tabelle 4.3-1) des Schweizer Datums CH1903 auszuwählen. Diese Definition wurde bei der Berechnung des astrogeodätischen Geoids der Schweiz [Gurtner, 1978] übernommen.

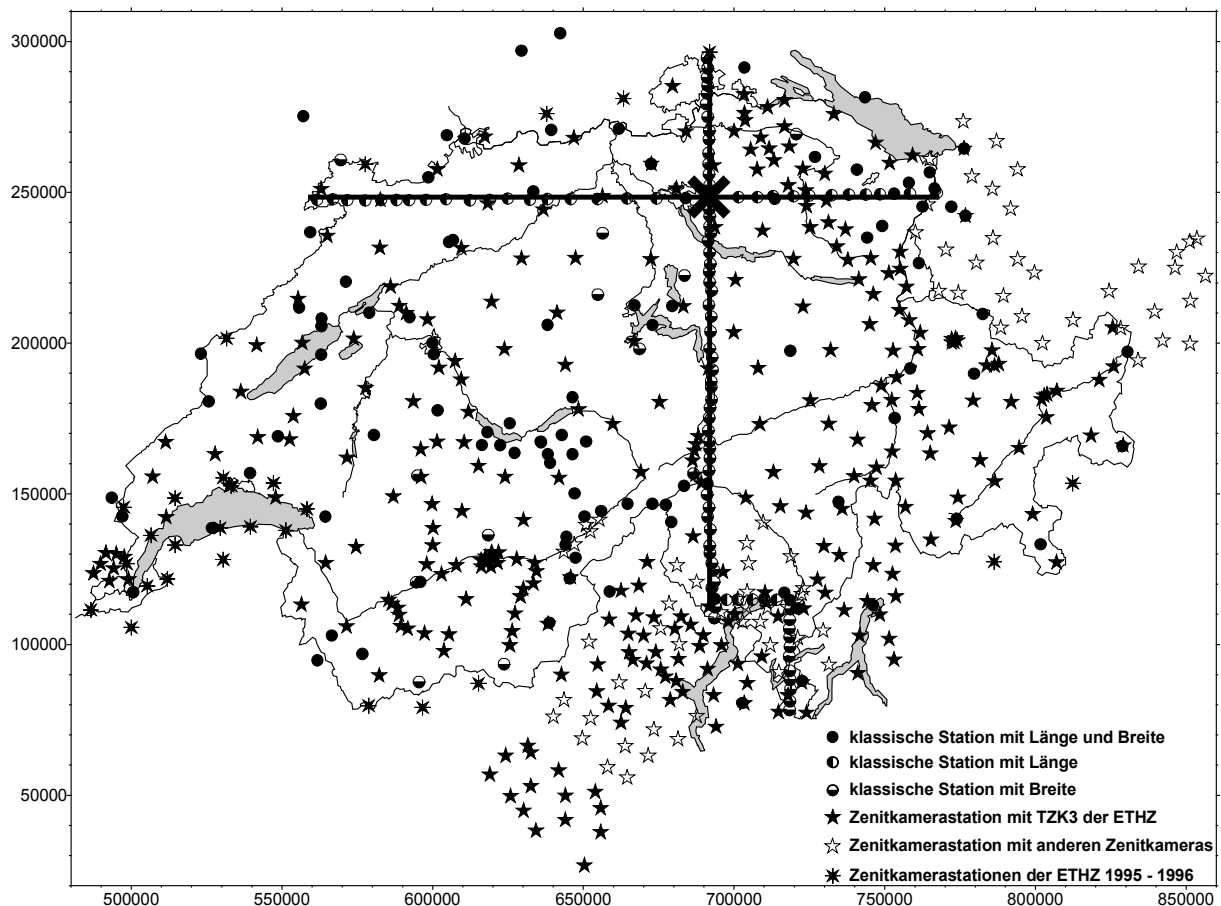


Abbildung 4.3-7: Schnittpunkt S_0 der Geoidprofile (im Meridian des Gotthard und auf dem Parallel durch Zürich) in Schwerzenbach (ZH)

Anlässlich der Auswertung der zweiten Messung des Landesnivellements wurden systematische Höhenänderungen im Bereich der Alpen relativ zum Mittelland aufgedeckt. Die Resultate deckten sich mit den Modellen der Alpentektonik, welche in den erdwissenschaftlichen Fachbereichen im Entstehen waren. Das Phänomen wurde schliesslich nach längeren wissenschaftlichen Diskursen als tektonische Hebung der Alpen interpretiert.

In der gemeinsamen Ausgleichung der Landesnivellements aus verschiedenen Messepochen wurden in der Folge kinematische Ansätze verwendet. Damit neben der Höhe auch ein diskretes Feld der Vertikalgeschwindigkeiten geschätzt werden konnte, war die Definition eines hypothetischen Bezugspunktes mit vorgegebener Geschwindigkeit notwendig. Aufgrund tektonischer Überlegungen wurde eine Nivellement-Fixpunktgruppe¹ in Aarburg (AG) am Jurasüdfuss ausgewählt und ihre Vertikalgeschwindigkeit $\dot{H}_0 = 0$ festgesetzt. Damit wurde faktisch ein weiterer geodätischer Fundamentalpunkt für das kinematische Modell des Landesnivellements festgelegt.

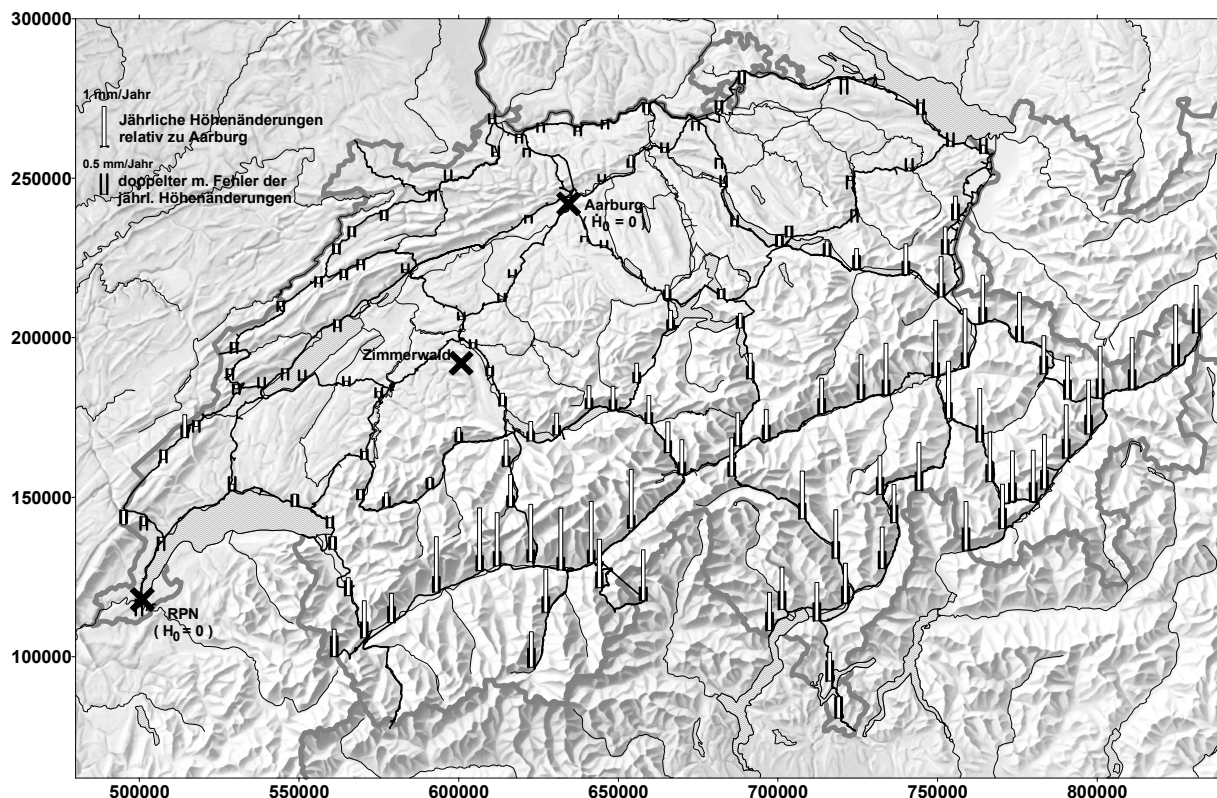


Abbildung 4.3-8: Kinematische Ausgleichung des Landesnivellements mit der Bezugspunktgruppe Aarburg ($\dot{H}_0 = 0$)

¹ Faktischer Referenzpunkt: AG 471 / T3V 117 (vertikal versetzter Bronzebolzen)

Terrestrische Bezugssysteme: *CH1903 / CHTRS95 / CH1903+* und **Fundamentalepunkte der Landesvermessung (*LV03 / LN02 und LV95 / LHN95*)**

Bisher: "Ideelle" Fundamentalpunkte:	Erneuert: "Realer" Fundamentalpunkt Z_0 :	
CH1903 (<i>LV03/LN02</i>) <i>Ellipsoid: Bessel 1841</i> <i>($a = 6\,377\,397.155\text{ m}$; $1/f = 299.15281285$)</i>	CHTRS95 (<i>CHTRF95</i>) <i>Ellipsoid: GRS80</i> <i>($a = 6\,378\,137.00\text{ m}$; $1/f = 298.257222101$)</i>	CH1903+ (<i>LV95/LHN95</i>) <i>Ellipsoid: Bessel 1841</i> <i>($a = 6\,377\,397.155\text{ m}$; $1/f = 299.15281285$)</i>
P₀: Alte Sternwarte Bern: $\lambda_0 = 7^\circ 26' 22.50''$ $\varphi_0 = 46^\circ 57' 08.66''$ h_0 (nicht festgelegt) $\xi_0 = 0''$ $\eta_0 = 0''$ (implizit festgelegt)	Z₀: Geostation Zimmerwald: $\lambda_0 = 7^\circ 27' 54.984\,9''$ $\varphi_0 = 46^\circ 52' 37.541\,6''$ $h_0 = 947.149\text{ m (ell.)}$ (von <i>ETRF93</i> ; $t = 1993.0$ abgeleitet) $\xi_0 = 8.46''$ $\eta_0 = 4.02''$ (Geoidberechnung 1998)	Z₀: Geostation Zimmerwald: $\lambda_0 = 7^\circ 27' 58.417\,7''$ $\varphi_0 = 46^\circ 52' 42.270\,3''$ $h_0 = 897.361\text{ m (ell.)}$ (Lage von TP Gurten abgeleitet) $\xi_0 = 3.73''$ $\eta_0 = 1.68''$ (Geoidberechnung 1998)
RPN: Repère Pierre du Niton $H_0 = 373.600\text{ m (Gebrauchshöhe)}$ (Anschluss: Pegel Marseille)	Z₀: Geostation Zimmerwald: $H_0 = 897.802\,7\text{ m (orthometrische Höhe)}$ (Anschluss: UELN, Pegel Amsterdam)	Z₀: Geostation Zimmerwald: $H_0 = 897.906\,3\text{ m (orthometrische Höhe)}$ (Anschluss: RPN, Pegel Marseille)
S₀: Schnittpunkt: Profile Schwerzenbach $N_0 = 0\text{ m (y = 691971m / x = 248240m)}$ (per Definition)	Z₀: Geostation Zimmerwald: $N_0 = 49.346\,3\text{ m}$ (aus $N_0 = h_0 - H_0$ abgeleitet)	Z₀: Geostation Zimmerwald: $N_0 = -0.545\,3\text{ m}$ (Geoidberechnung 1998)
<i>Nur für die kinematische Ausgleichung des LN gilt:</i> A₀: Kinemat. Bezugspunkt Aarburg: $\dot{H}_0 = 0\text{ mm/J (per Definition)}$	<i>Zur Definition des kinematischen Modells CHKM95 gilt ($t_0 = 1993.0$):</i> Z₀: Geostation Zimmerwald: 3D-Geschwindigkeitsvektor $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ im <i>ETRS89</i> vorläufige Näherung: $\dot{X} = \dot{Y} = \dot{Z} = 0$ (Nullvektor)	<i>Kein kinematisches Modell (Koord. und Höhen sind nur für $t_0 = 1993.0$ definiert)</i>

Tabelle 4.3-1: Bisherige "ideelle" Fundamentalpunkte und die Geostation Zimmerwald als neuer, "realer" Fundamentalpunkt

4.4 Wahl des Höhensystems

Das Projekt LV95 beinhaltet auch die Einführung neuer Höhensysteme für die Schweizerische Landesvermessung. In der Projektphase sind noch nicht alle Grundlagen für eine rasche Realisierung dieser Systeme vorhanden. Deshalb können zurzeit nur generelle Annahmen zur Wahl der Systeme getroffen werden. Wichtig scheint aber, dass mit der dreidimensionalen Festlegung eines realen Fundamentalpunktes in Zimmerwald auch eine dazu kompatible Datumsdefinition der Höhensysteme erfolgt.

In 3.4 wurde die Forderung nach einem potentialtheoretisch strengen Höhensystem für die neue Landesvermessung aufgestellt. Als mögliche Kandidaten kommen nur das 'strenge' orthometrische Höhensystem oder das Normalhöhensystem nach der Theorie von Molodensky [Molodensky et al., 1962] in Frage. Die Vor- und Nachteile dieser beiden Systeme sollen in diesem Abschnitt erörtert werden.

Die orthometrische Höhe H eines Punktes ist sein Abstand vom Geoid, gemessen entlang der durch den Punkt verlaufenden gekrümmten Lotlinie, während sich die Normalhöhe H_{norm} auf eine andere Bezugsfläche, das sog. Quasigeoid, bezieht. Bei der Berechnung der beiden Höhenarten wird vom gleichen Geopotentialwert¹ C ausgegangen. Dieser wird aus den nivellierten Höhendifferenzen dH und den gemessenen Schwerewerten g wie folgt aufsummiert:

$$C = C_0 + \sum g \, dH \quad (4.4-1)$$

Zur Berechnung der orthometrischen Höhe H wird nun der Geopotentialwert C durch die mittlere Schwere in der Lotlinie $\bar{g}$ dividiert; während für die Normalhöhe H_{norm} durch die mit der Normal-schwereformel leicht berechenbare mittlere Normalschwere in der Lotlinie $\bar{\gamma}$ dividiert wird.

$$H = C / \bar{g} \quad H_{\text{norm}} = C / \bar{\gamma} \quad (4.4-2,3)$$

Die Normalhöhe H_{norm} ist einfach und zudem streng und hypothesenfrei berechenbar, während bei der orthometrischen Höhe H Modelle (Hypothesen) über die Massenverteilung der Erde in der Umgebung des Punktes verwendet werden müssen, da die direkte Messung der Schwere im Erdinnern i.A. nicht möglich ist. Frühere Ansätze, die mittlere Schwere entlang der Lotlinie anhand der topografischen Massen zu berechnen [Niethammer, 1932], sind am damals unverhältnismässigen Rechenaufwand gescheitert. Eine wesentlich elegantere Methode [Wirth, 1990], welche das digitale Höhenmodell DHM25 der L+T und leistungsfähige Rechenprogramme verwendet, erlaubt die effiziente Berechnung von sog. 'strengen' orthometrischen Höhen, welche der wahren Länge der Lotlinie zumindest sehr nahe kommen.

Im Gegensatz zu früheren geodätischen Arbeiten im Bereich der Landeshöhennetze, welche sich ausschliesslich auf Nivellement und Schwere gestützt hatten, muss heute berücksichtigt werden, dass mit GPS ellipsoidische Höhenunterschiede über kontinentale Entfernungen rasch und genau gemessen werden können. Gelingt es dabei, den Einfluss der troposphärische Refraktion auf die GPS-Signale genügend genau zu berechnen und steht gleichzeitig ein genaues Geoid- bzw. Quasigeoidmodell zur Verfügung, so können beide Messmethoden in idealer Weise kombiniert werden.

Zwischen den ellipsoidischen h , orthometrischen H und Normalhöhen H_{norm} bestehen die einfachen geometrischen Zusammenhänge:

$$h = H + N = H_{\text{norm}} + \zeta \quad (4.4-4)$$

wobei N die Geoidundulation (Abstand des Geoids vom Ellipsoid) und ζ die Höhenanomalie (Abstand des Quasigeoids vom Ellipsoid) ist.

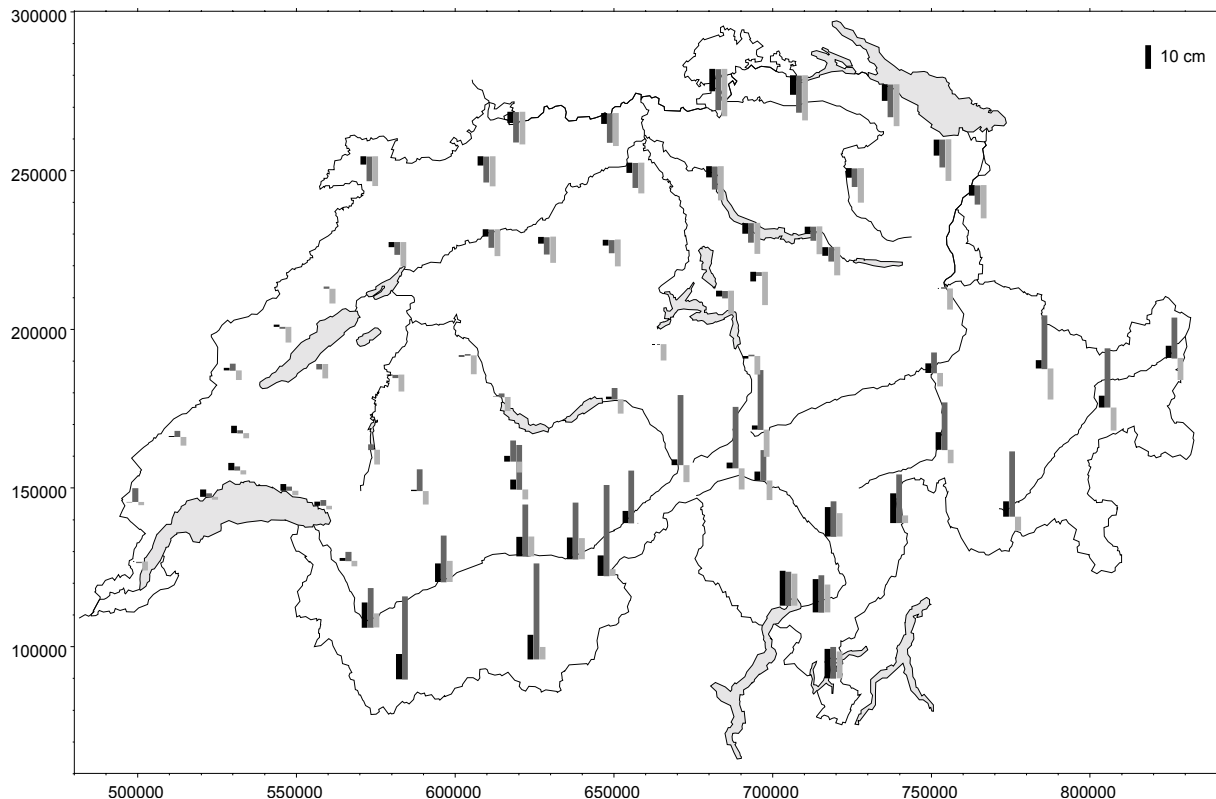
Bleibt die Frage zu klären, welches Höhensystem für die Anwendung im topografisch schwierigen Gebiet der Schweiz als Ersatz der bisherigen Gebrauchshöhen vorzuziehen ist. Zur Untersuchung der praktischen Auswirkungen dieser Wahl wurde versucht, die Grösse der Unterschiede zwischen dem bisherigen und den neuen Systemen abzuschätzen. Dabei wurde von den heute offiziell gültigen Gebrauchshöhen der Nivellementsunkte (LN02) ausgegangen. Diese wurden zu Beginn des Jahrhunderts linienweise als sog. provisorische Gebrauchshöhen laufend publiziert, wobei damals ein Grossteil der Knotenwerte aus dem früheren 'Nivellement de précision 1864-91' der SGK festgehalten wurde. Seither wurden die Höhen der Knotenpunkte im Prinzip nicht mehr verändert². Neue Messun-

¹ C_0 : Potential des Ausgangspunktes

² Ein beträchtlicher Teil dieser Knotenpunkte besteht heute nicht mehr.

gen wurden jeweils in diese Knotenpunkte (oder davon abgeleitete Ersatzpunkte) eingezwängt. Da sich jedoch die Alpen gegenüber dem Mittelland mit bis zu 1.5 mm pro Jahr heben [Gubler et al., 1984], sind die festgehaltenen Werte dieser Punkte nicht mehr repräsentativ für die heutige Zeit. Zudem entstehen durch die Vernachlässigung der Schwere systematische Abweichungen gegenüber einem potentialtheoretisch strengen Höhensystem.

Im weiteren Verlauf der Testberechnungen wurden ausgewählte stabile Punkte (mittlerer Abstand ca. 10 km) des Landesnivellements unter Berücksichtigung der Hebungsraten und unter Einbezug der Schweremessungen als geopotentielle Knoten ausgeglichen. Um orthometrische Höhen zu erhalten, mussten diese noch durch die mittlere Schwere entlang der Lotlinie dividiert werden. Diese wiederum wurde aus den gemessenen Oberflächenschwerewerten und aus Massenmodellen [Wirth, 1990] berechnet. Neben den orthometrischen Höhen und zu deren Vergleich wurden auch Normalhöhen durch Division der geopotentiellen Knoten durch die mittlere Normalschwere in der Lotlinie berechnet.



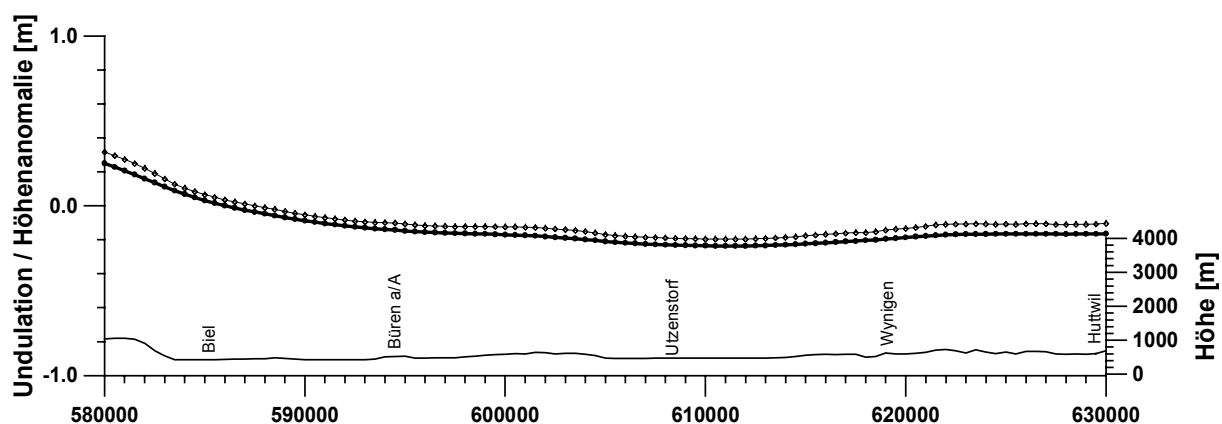
Legende: **schwarze Balken** (links): Höhenänderung verursacht durch Netzzwänge und Kinematik (Differenz der Ergebnisse aus einer kinematischen Netzausgleichung ohne Berücksichtigung der Schwere minus offizielle Gebrauchshöhen)
dunkelgraue Balken (Mitte): Differenz orthometrische Höhen minus offizielle Gebrauchshöhen
hellgraue Balken (rechts): Differenz Normalhöhen minus offizielle Gebrauchshöhen

Abbildung 4.4-1: Vergleich zwischen den offiziellen Gebrauchshöhen ausgewählter Punkte des Landesnivellements und den neuen Höhensystemen

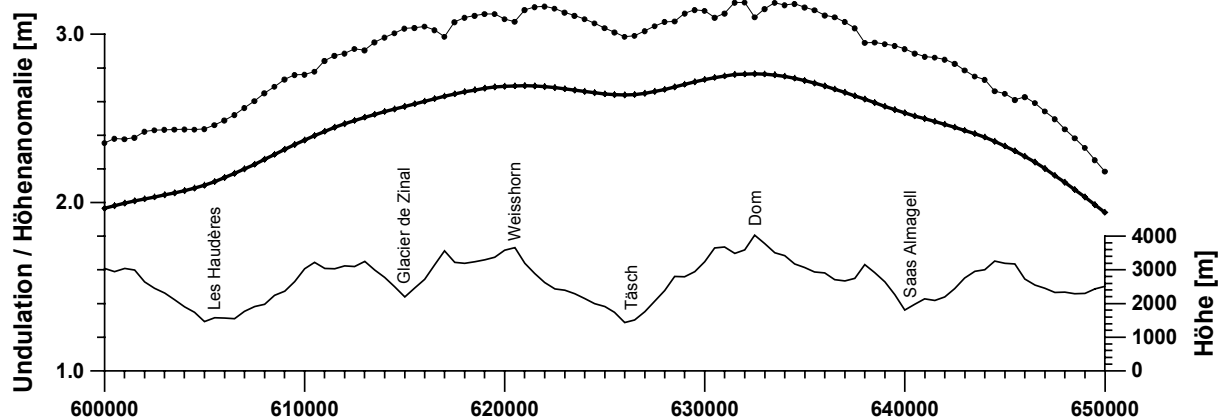
In Abbildung 4.4-1 ist der Effekt der Kinematik (Alpenhebung) und der Elimination des Zwangs der Knotenpunkte anhand der linken, fettschwarzen Balken deutlich sichtbar. Im Norden der Schweiz sind gegenüber dem Referenzpunkt in Genf leicht negative Änderungen zu beobachten. Im Alpenraum jedoch treten positive Änderungen von mehr als 10 cm auf. Im Wallis und in Graubünden ist dieser Effekt jedoch kleiner als derjenige, welcher durch die Vernachlässigung der Schwere entsteht (mittlere Balken). Hier wurden maximale Höhenänderungen bis zu 50 cm berechnet, welche einer Kippung in Nord-Süd-Richtung von etwa 0.5" entsprechen. Eine Ausnahme bildet einzig das Tessin, wo die Höhenänderungen bereits durch die Berücksichtigung der Alpenhebung und der Elimination der Zwänge erklärt werden können. Der Unterschied zwischen den orthometrischen Höhen und den Normalhöhen (rechte Balken) zeigt eine starke Korrelation mit der Punkthöhe auf. Während im Mittelland die beiden Höhensysteme praktisch identisch sind, treten auf den Alpenpässen (z.B. in einer Höhe von 2000 m) Differenzen von bis zu 40 cm auf.

Diese Voruntersuchungen haben gezeigt, dass beim Aufbau eines Höhennetzes in tektonisch aktiven Gebieten die Kinematik der Erdkruste nicht vernachlässigt werden darf. Messdaten aus verschiedenen Epochen müssen mit Hilfe von kinematischen Ausgleichungsmodellen ausgeglichen werden. Soll zudem GPS für die Höhenbestimmung mitverwendet werden (kombinierte Netze), so wird ein nach potentialtheoretischen Gesichtspunkten strenges Höhensystem (orthometrische Höhen oder Normalhöhen) benötigt. Voraussetzung für einen genauen Übergang von ellipsoidischen Höhen zu orthometrischen Höhen oder Normalhöhen ist die Verfügbarkeit genauer Bezugsflächen (Geoid- bzw. Quasigeoidmodell).

Die Bezugsflächen (Geoid- bzw. Quasigeoid) müssen dem Benutzer in Form von Computermodellen zur Verfügung gestellt werden. Wie die Arbeiten für das neue Geoid [Marti, 1997] gezeigt haben, ist es dabei nicht sehr schwierig, Geoid- oder Quasigeoidmodelle für das schweizerische Mittelland herzustellen, da beide Flächen in der ruhigen Topografie des Flach- und Hügellandes einen glatten Verlauf zeigen (s. *Abbildung 4.4-2 a*) und damit relativ leicht numerisch approximierbar sind. Im Gegensatz dazu stellt die Modellierung im Alpenraum viel höhere Anforderungen für das Quasigeoid als für das Geoid (s. *Abbildung 4.4-2 b*). Hier zeigt das Quasigeoid höherfrequente Änderungen mit Amplituden im dm-Bereich, die schwieriger zu modellieren sind. Dies ist damit zu erklären, dass die Quasigeoidfläche viel stärker mit der Topografie korreliert ist als dies beim Geoid der Fall ist.



a) West-Ost-Profil im Mittelland (Biel bis Huttwil; $x = 220$ km)



b) West-Ost-Profil im Alpengebiet (Grande Dixence bis italienische Grenze; $x = 103$ km)

Legende: *feine Linie:* Topographie
fette Linie mit Rechenpunkten: Geoid
feine Linie mit Rechenpunkten: Quasigeoid

Abbildung 4.4-2: Vergleich von Topo-, Geoid- und Quasigeoidprofilen a) im Mittelland und b) im schweizerischen Alpenraum

Für die Schweiz sind bei der Wahl des neuen Höhensystems neben den theoretischen Vorzügen der Systeme auch die Konsequenzen bei einer allfälligen Umstellung der Amtlichen Vermessung und der Bezug des Landeshöhennetzes mit den Netzen der Nachbarländer zu berücksichtigen.

Die Situation in den Nachbarländern präsentiert sich leider ziemlich uneinheitlich. Frankreich hatte schon 1969 mit dem Netz IGN 69 ein Normalhöhenystem eingeführt [Levallois et Maillard, 1970]. Österreich ersetzt das derzeitige normal-orthometrische Höhenystem durch ein 'strenges' orthometrisches Höhenystem [Höggerl, 1986]. Für die Reduktion der Höhen wird dabei eine entlang den Lotlinien aus Massenmodellen berechnete mittlere Schwere verwendet. In Deutschland hat man nach der Wiedervereinigung wiederum umgekehrt entschieden, das in den neuen Bundesländern verbreitete Normalhöhenystem in der ganzen Bundesrepublik einzuführen [AdV, 1995]. Für Italien, das ein normal-orthometrisches System hat, wurde ein Quasigeoidmodell berechnet [Barzaghi et al., 1996], womit zumindest eine Voraussetzung für die Einführung eines Normalhöhenystems vorhanden ist. Inwieweit man sich in Italien für eine Umstellung der Landesvermessung entschieden hat, ist nicht bekannt.

Unter dem Titel *United European Levelling Network (UELN)* hat eine Subkommission der IAG in den letzten Jahrzehnten drei europäische Gesamtausgleichungen der Nivellementnetze 1. Ordnung Europas (aber ohne die damals sozialistischen Staaten) berechnet, eine mit Stand 1955 [Alberda, 1963], eine mit Stand 1973 [Ehrensperger and Kok, 1986] und die neueste mit Stand 1995 [Sacher et al., 1998]. Der Schweizer Beitrag zu diesen Ausgleichungen umfasste je eine Nord-Süd-Achse (Basel - Olten - Andermatt - Chiasso), eine nördliche Ost-West-Achse (Genf - Olten - Schaffhausen - St. Margrethen) dem Jurafuss entlang, eine zweite entlang der Rhein-Rhone-Linie (Genf - Sion - Andermatt - Landquart - St. Margrethen) sowie eine Verbindung Landquart - Martinsbruck (s. Abbildung 4.4-3). In der ersten Lösung waren die Messungen des ersten Landesnivellements (1905 bis 1925), in der zweiten und dritten jene des zweiten Landesnivellements (1943 bis 1976) enthalten. Die Knotenpunkte und die entsprechenden Geopotentialkoten dieser Ausgleichungen bilden Höhenbezugsrahmen, welche für eine globale Lagerung unseres Landeshöhennetzes dienen könnten. Damit lassen sich eindeutige Beziehungen zum jeweiligen Höhendatum der europäischen Nachbarländer herstellen. Die dritte Ausgleichung (UELN-95) enthält neben neueren Messungen in den westeuropäischen Ländern erstmals auch die Nivellements der osteuropäischen Länder. Alle diese Ausgleichungen vernachlässigen die in Kap. 3.3 und Kap. 4.3 (Abbildung 4.3-8) erwähnten rezenten Bewegungen der Erdkruste, sind also statische Ausgleichungen.

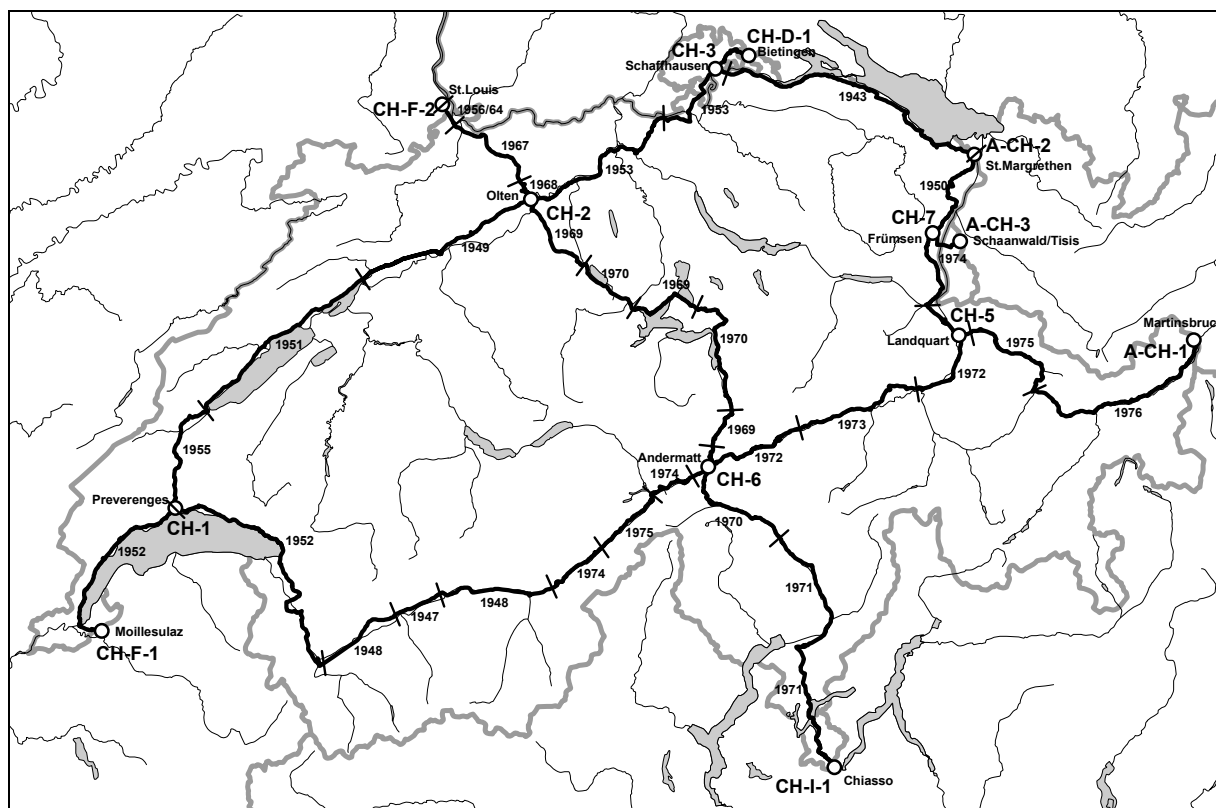


Abbildung 4.4-3: UELN-Teilnetz CH

Parallel zur statischen Ausgleichung UELN-95 wird ein neues europäisches geokinematisches Höhenreferenznetz vorbereitet, das sich auf alle vorhandenen geodätischen Beobachtungen stützen soll (GPS, Nivellement, Meerespegel, Schweren etc.). Eigens zu diesem Zweck wurde im Mai 1997 eine GPS-Messkampagne (EUVN97) gemessen, welche die heute bestehenden Netze mit höchster Genauigkeit untereinander verbindet. So wurden ausgewählte Pegelstationen mit Knotenpunkten des UELN und EUREF-Punkten in einer einzigen GPS-Kampagne gemeinsam bestimmt. In die kinematische Höhenausgleichung sollen dann zusätzlich zu den GPS-Messungen alle im 20. Jahrhundert gemessenen Nivellements 1. Ordnung und Pegelregistrierungen einfließen. Dies wird zum ersten gesamteuropäischen kinematischen Höhensystem (EVS2000) führen.

In Tabelle 4.4-1 sind die Vor- und Nachteile der orthometrischen Höhen gegenüber den Normalhöhen zusammengestellt. Bei der Beurteilung der verschiedenen Kriterien für die Wahl des Höhensystems wurde dem Argument der besseren Modellierbarkeit des Geoids ein verhältnismässig grosses Gewicht beigemessen, da die Verwendung von kombinierten Netzen im Berggebiet in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Gerade bei den Verdichtungsnetzen im Jura, den Voralpen und Alpen werden die bisherigen Nivellemente aus wirtschaftlichen Gründen vermehrt durch GPS-Netze ersetzt werden müssen. Die relativ grossen Höhenänderungen, welche bei der Einführung der orthometrischen Höhen auf den Alpenpässen zu erwarten sind, scheinen hingegen kein schwer wiegendes Hindernis für die Umstellung in der AV zu sein. Im schweizerischen Mittelland und damit in den Agglomerationsgebieten, wo ein immenser Bestand an Höhendaten vorhanden ist, kann bezüglich der Auswahl der beiden Systeme kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden (s. *Abbildung 4.4-1*).

Kriterien	orthom. Höhen H	Normalhöhen H _{norm}
1) Theoretische Kriterien:		
– Potentialtheoretische Strenge der Systeme	+	+
– Hypothesen zur Dichteverteilung in der Erdkruste (Normalhöhen sind hypothesenfrei definierbar)	-	+
– Einfache Berechnung der Höhen aus den Potentialwerten	-	+
2) Vor- / Nachteile bei kombinierten Netzen (GPS):		
– Geometrische Anschaulichkeit der Bezugsflächen (Geoid / Quasigeoid)	+	-
– Einfache geometrische Beziehung zu den ellipsoidischen Höhen mit Hilfe von Geoid- / Quasigeoidmodellen herstellbar	+	+
– Modellierbarkeit der Bezugsflächen (Geoid / Quasigeoid) im Flachland und Hügelland	+	+
– Modellierbarkeit der Bezugsflächen (Geoid / Quasigeoid) im Alpengebiet	+	-

Tabelle 4.4-1: Vor- und Nachteile der orthometrischen Höhen gegenüber den Normalhöhen als Ersatz der bisherigen Gebrauchshöhen

Unter Berücksichtigung dieser Argumente hat die *Arbeitsgruppe LV95* als Ergänzung zum **"lokal gelagerten" Bezugssystem CH1903+** die Einführung orthometrischer Höhen (Bezugsrahmen LHN95) mit dem Höhendatum Zimmerwald Z_0 vorgeschlagen. Diese sollen durch Anschluss an den Repère Pierre du Niton (RPN) und damit indirekt an den Pegel Marseille (s. *Tabelle 3.3-1* und *Kap. 5*), abgeleitet werden, womit ein Bezug von LHN95 zu den bisherigen Gebrauchshöhen LN02 hergestellt ist. Bei der praktischen Einführung des neuen Höhenbezugssystems LHN95 ist der Verwechslungsgefahr mit LN02-Höhen Beachtung zu schenken.

Zum **"global gelagerten" Bezugssystem CHTRS95** gehört ebenfalls ein nationaler Höhenbezugsrahmen. Dieser basiert im Unterschied zu LHN95 auf geopotentiellen Knoten mit Ausgangsdatum Zimmerwald Z_0 , abgeleitet vom Knoten Olten des UELN und damit indirekt vom Pegel Amsterdam (s. *Kap.5*). Aus den Geopotentiellen Knoten können je nach Wunsch 'auf Knopfdruck' sowohl orthometrische Höhen wie auch Normalhöhen im selben System abgeleitet werden. Damit wird die Forderung nach Kompatibilität des "global gelagerten" Höhenbezugsrahmens mit den Netzen der Nachbarländer erfüllt. Zur Vermeidung von Verwechslungen mit LHN95- oder LN02-Werten sollen CHTRS95-Höhen nur mit dem ausdrücklichen Hinweis: *"Achtung: Diese Werkhöhen für spezifische Spezialanwendun-*

gen sind nicht in Übereinstimmung mit den offiziellen Höhenangaben der Landesvermessung" herausgegeben werden.

4.5 Kinematische Modelle für LV95

Damit die hohen Anforderungen bezüglich der Genauigkeit moderner geodätischer Netze erfüllt werden können, ist es unabdingbar, den kleinen Bewegungen der auf der obersten Erdkruste verankerten geodätischen Messpunkte Rechnung zu tragen. Diese Bewegungen werden durch Änderungen der Lagekoordinaten und Höhen der Messpunkte pro Zeitintervall parametrisiert. Unter der Voraussetzung der zeitlichen Kontinuität lassen sich diese Bewegungen durch zwei- oder dreidimensionale, diskrete Geschwindigkeitsfelder bestimmen. Räumlich stetige Geschwindigkeitsfelder oder Strainfelder eignen sich schliesslich zur Beschreibung der Deformationen im Kontinuum. Es gilt dabei zu beachten, dass aufgrund der relativen Natur der geodätischen Messungen mindestens ein Geschwindigkeitsvektor eines beliebigen Referenzpunktes festgehalten werden muss, um überhaupt ein Geschwindigkeitsfeld bestimmen zu können. Die geodätische Netzausgleichung in der Raum-Zeit-Domäne wird als kinematische Ausgleichung bezeichnet. Dabei werden simultan mit den Koordinaten und Höhen der geodätischen Punkte deren zeitlichen Ableitungen (Geschwindigkeitsvektoren) geschätzt. Die resultierenden Geschwindigkeits- oder Strainfelder werden auch als kinematische Modelle bezeichnet.

Die Festlegung eines lokalen/regionalen kinematischen Modells (CHKM95) ist ein wesentlicher Bestandteil der geodätischen Systemdefinition *CHTRS95*. CHKM95 muss sowohl die regionale Bewegung im Gebiet der Schweiz bezüglich des kontinentalen Bezugssystems *ETRS89* (Divergenz des Systems *CHTRS95* bezüglich *ETRS89*) sowie die lokalen Bewegungen (Deformationen) innerhalb der Grundlagentetze (LV95 und LHN95) dreidimensional beschreiben.

Das regionale Geschwindigkeitsfeld dient dabei dazu, *CHTRS95* so auf der lokalen Erdkruste festzuhalten, dass die *CHTRF*-Koordinatensätze im Laufe der Zeit möglichst wenig ändern und die 3D-Koordinaten des Fundamentalpunktes Z_0 über längere Zeit konstant bleiben. Die regionale Modellierung ist durch die Festlegung der 3D-Koordinaten und der 3D-Geschwindigkeit des Fundamentalpunktes Z_0 im *ETRS89* (und damit indirekt im *ITRS*) gegeben (s. 4.2).

Für die Modellierung der lokalen, relativen Kinematik der obersten Erdkruste in der Schweiz kommen die in Tabelle 4.5-1 angeführten Ansätze in Frage. Die konkrete Berechnung wird sinnvollerweise erst nach der Auswertung von Wiederholungsmessungen im GPS-Landesnetz erfolgen.

lokales relativ kinematisches Modell (im CHTRS95)	Lage 2-dim	Lage/Höhe 3-dim	Zeit-modell	Vor- / Nachteile
A) Diskretes Geschwindigkeitsfeld	x	x	linear	- keine räumliche Kontinuität; Prädiktion erschwert
B) Starres Blockmodell (2 bis n Blöcke)	x	x	linear	- Singularität an Blockgrenzen - Definition schwierig
C) Strain-Modell (Interpolation → Strain-Raten)	x	(x)	linear	- räumliche Kontinuität

Tabelle 4.5-1: Mögliche lokale kinematische Modelle für CHTRS95

4.6 Kartenprojektionen für LV95

Wie in 3.2 erwähnt, gibt es im Falle des "lokal gelagerten" Bezugssystems *CH1903+* kaum Gründe, von der bisherigen schweizerischen Landes-Kartenprojektion, der schiefachsigen winkeltreuen Zylinderprojektion [Rosenmund, 1903] abzuweichen. Die entsprechenden Projektionsformeln (s. Anhang A6) sowie die Reduktionsformeln in die Projektionsebene mit all den zugehörigen Parametern werden deshalb beibehalten.

Beim "global gelagerten" Bezugssystem *CHTRS95*, welches sich im Besonderen auch für den Austausch von raumbezogenen Daten mit dem Ausland eignet, besteht ein Bedürfnis nach einem europaweit, wenn nicht sogar weltweit, anwendbaren Projektionssystem. Deshalb wird als Kartenprojektion zu *CHTRS95* die global gültige und in den meisten Ländern gebräuchliche *Universal Mercator Projection*

(UTM) [Snyder, 1983] auf dem GRS80-Ellipsoid definiert. UTM wurde 1947 von der U.S. Army für grossmassstäbliche Militärkarten eingeführt. Es handelt sich dabei um eine ellipsoidische transverse Merkatorprojektion, bei welcher für die ganze Welt (genauer: zwischen nördlicher Breite 84° und südlicher Breite 80°) spezifische Parameter wie Abbildungszonen (grid zones), Zentralmeridiane und Massstabsfaktoren festgelegt wurden und damit die Grundlage für eine weltweite Anwendung geschaffen wurde.

Bei der UTM-Kartenprojektion wird die Erdoberfläche in 60 Längengrad-Streifen von je 6°-Bereichen eingeteilt, welche ausgehend vom 180°-Meridian in östlicher Richtung von 1 bis 60 durchnummeriert sind. Für das militärische Meldewesen sind die Längengrad-Streifen zusätzlich in 8°-Breitengrad-Zonen¹ unterteilt, welche wiederum von Süd nach Nord mit den Buchstaben des Alphabets bezeichnet sind. Auf der nördlichen Hemisphäre wird der Schnittpunkt des Zentralmeridians mit dem Äquator als 'Nullpunkt' der kartesischen UTM-Koordinaten jeder Zone mit den Werten $E_0 = 500'000$ m ('false easting') und $N_0 = 0$ m ('false northing') festgelegt. Das Territorium der Schweiz liegt abgesehen vom westlichsten Zipfel des Kantons Genf (Gemeinden Chancy und Dardagny) einheitlich in der Gitterzone 32 (T) mit dem Zentralmeridian 9° (geogr. Länge: 6°-12°, Breite: 40°-48°), was den praktischen Gebrauch wesentlich erleichtert. Um die Massstabsverzerrungen innerhalb der Zonen auf ein Minimum zu beschränken, wird bei UTM ein einheitlicher Massstabsfaktor von 0.9996 verwendet.

Da *CHTRS95* mindestens zum Zeitpunkt $t = 1993.0$ mit *ETRS89* identisch ist, können UTM (*CHTRS95*)-Koordinaten mit cm-Genauigkeit ohne Probleme über die Landesgrenzen hinaus ausgetauscht werden.

5 Festlegung der Terrestrischen Bezugssysteme für LV95

5.1 Allgemeines zur Festlegung der Bezugssysteme

Bei der Festlegung der neuen Bezugssysteme sind verschiedene Parameter als Konstanten zu definieren. Andere Grössen können von diesen Konstanten abgeleitet werden oder sind der direkten Beobachtung zugänglich. Diese fundamentalen Grössen werden für die zukünftigen Arbeiten in der Landesvermessung von grosser Bedeutung sein. In diesem Kapitel wird daher eine klare und eindeutige Angabe der Parameter angestrebt. In den folgenden Abschnitten werden die "per Definition" festgelegten Zahlenwerte der Konstanten in **Fettschrift**, die abgeleiteten Zahlenwerte in Normalschrift und die provisorischen Werte in *Kursivschrift* abgedruckt. Die den neuen Fundamentalpunkt Z_0 in Zimmerwald betreffenden Werte werden zudem mit einem Index $_0$ versehen.

Die Festlegung aller notwendigen Parameter erfolgt grundsätzlich im "realen" Fundamentalpunkt Zimmerwald Z_0 (s. 4.3). Für die Wahl der Form und Grösse sowie der Lagerung des Bezugsellipsoids gegenüber *ETRS89* zur Epoche t_0 sind dabei die folgenden 9 Parameter festzulegen:

- (1) Grosse Halbachse des Bezugsellipsoids: **a**
- (2) Abplattung des Ellipsoids: **$1/f$** oder Quadrat der numerischen Exzentrizität: **e^2**
wobei für die kleine Halbachse b gilt: $1/f = a / (a-b)$ und $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$
- (3-5) geozentrisch-kartesische Koordinaten von Z_0 im zu definierenden System: **X_0, Y_0, Z_0**
oder die entsprechenden geodätischen Koordinaten des Fundamentalpunktes: $\lambda_0, \varphi_0, h_0$
- (6-8) 3 Orientierungen: z.B. 3 Drehwinkel: **r_X, r_Y, r_Z** bezüglich den Achsen X, Y, Z
oder die Bedingung der Achsenparallelität: **$r_X = r_Y = r_Z = 0$**
- (9) 1 Massstabsfaktor: **s**
oder die Bedingung der Massstabsgleichheit: **$s = 1$**

Zusätzlich sind u.U. kinematische Grössen festzulegen, um damit das System auch in der Zeitdomäne zu definieren. Mögliche kinematische Parameter sind:

- (3'-5') zeitliche Ableitungen der Koordinaten (Geschwindigkeit) des Fundamentalpunktes: **$\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0$**
oder die Bedingung: Geschwindigkeit: **$\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0 = 0$**
- (6'-8') zeitliche Ableitungen der Drehwinkel: **$\dot{r}_X, \dot{r}_Y, \dot{r}_Z$**
oder die Bedingung: Winkelgeschwindigkeit: **$\dot{r}_X = \dot{r}_Y = \dot{r}_Z = 0$**

¹ In der Geodäsie nicht verwendet, da mit dem Nordwert redundant

Der lokale Bezug dieser Systeme zum Geoid wird durch die Oberflächenlotabweichungen ξ_0 , η_0 und die Geoidundulation N_0 im Fundamentalpunkt Z_0 beschrieben. Es handelt sich dabei um abgeleitete Grössen, welche von der beobachtbaren astronomischen Länge Λ_0 und astronomischen Breite Φ_0 sowie von der orthometrischen Höhe H_0 wie folgt abhängig sind (Annahme der Achsparallelität zwischen astronomischem und terrestrischem Bezugssystem):

$$\xi_0 = \Phi_0 - \varphi_0, \quad \eta_0 = (\Lambda_0 - \lambda_0) \cos \varphi_0 \quad \text{und} \quad N_0 = h_0 - H_0 \quad (5.1-1)$$

5.2 Festlegung des "global gelagerten" Bezugssystems CHTRS95

Die Festlegung des Schweizerischen Bezugssystems *CHTRS95* wird, wie in 4.1 dargelegt, primär vom Europäischen Bezugssystem *ETRS89* abgeleitet. Wie bei *ETRS89* wird demnach das GRS80-Ellipsoid (s. Tabelle 5.2-1) verwendet. Bei der Festlegung der Lagerungsparameter muss allerdings eine mögliche Anpassung an die komplexe tektonische Realität im Alpenraum (regionales und lokales kinematisches Modell) vorgesehen werden.

Am einfachsten könnte *CHTRS95* in ähnlicher Weise wie *ETRS89* durch lediglich 3 räumliche Drehungen von *ITRS* (s. 2.3) abgeleitet werden. Die Drehung liesse sich aus dem Geschwindigkeitsvektor des Fundamentalpunktes Z_0 für den Zeitpunkt $t_0 = 1993.0$ berechnen. Dieser Geschwindigkeitsvektor ist zurzeit allerdings noch nicht mit genügender Genauigkeit bekannt.

Eine Festlegung von *CHTRS95* im realen Fundamentalpunkt Z_0 durch direkte Fixierung des Systems auf der lokalen Erdkruste ist für die Landesvermessung vorzuziehen. Mit den zusätzlichen Bedingungen der Achsparallelität und des identischen Massstabs bezüglich *ETRS89* sowie der Festlegung der 3D-Koordinaten und eines 3D-Geschwindigkeitsvektors (je zur Epoche t_0) des Fundamentalpunktes Z_0 wird damit *CHTRS95* als sog. "global gelagertes" Bezugssystem eindeutig definiert.

Bezugsellipsoid	Grosse Halbachse a	kleine Halbachse b	Abplattung 1/f	Exzentrizität ² e ²
GRS80-Ellipsoid (wie <i>ETRS89</i>)	6 378 137.00 m	6 356 752.3141 m	298.257 222 101	0.006 694 380 023
Lagerung	Orientierung	Massstab	Shift	
	achsparallel zu <i>ETRS89</i>	identisch mit <i>ETRS89</i>	Koord. / Geschwindigkeit in Z_0 (s. Tabelle 5.2-2)	

Tabelle 5.2-1: Definition des "global gelagerten" Bezugssystems CHTRS95

Zimmerwald Z_o : Festlegung der Koordinaten (<i>CHTRS95</i>) des Fundamentalpunktes zur Zeit t₀ (Bolzen GPS-Mast)			
X_o = 4 331 291.084 m	Y_o = 567 554.849 m	Z_o = 4 633 127.032 m	(<i>CHTRS95</i> , t₀ =1993.0)
λ₀ = 7 °27' 54.984 9"	φ₀ = 46° 52' 37.541 6"	h₀ = 947.149 m (ell.)	(Ellipsoid: GRS80)
Zimmerwald Z_o : Festlegung des Geschwindigkeit (<i>CHTRS95</i>) des Fundamentalpunktes zur Zeit t₀ (Bolzen GPS-Mast)			
Ẋ₀ = δX₀ / δt = 0	Ẏ₀ = δY₀ / δt = 0	Ż₀ = δZ₀ / δt = 0	(<i>CHTRS95</i> , t₀ =1993.0)

Tabelle 5.2-2: Fixierung des Bezugssystems CHTRS95 im Fundamentalpunkt Z_0 zur Zeit t_0

Die 3D-Koordinaten von Z_0 (zum Zeitpunkt t_0) werden dabei so gewählt, dass sie mit jenen aus der zurzeit besten Realisierung von *ETRS89* identisch sind. Für einen beliebigen Zeitpunkt t wird der Bezugsrahmen *CHTRFyy* aber mit *ETRFyy* nicht mehr identisch sein. Als Verbindungsglied muss zukünftig jeweils der regionale Anteil des kinematischen Modells CHKM95 (s. 4.5) einbezogen werden. Die in Tabelle 5.2-2 angegebenen Koordinaten und Geschwindigkeiten von Z_0 wurden durch Festhalten der *ETRF93*- [$t_0 = 1993.0$]-Werte zur Definition von *CHTRS95* im Fundamentalpunkt Z_0 "als Konstanten" festgelegt (s. Anhang A3 und A4.1). Die geodätischen Koordinaten λ_0 , φ_0 , h_0 können aus den geometrischen Beziehungen abgeleitet werden. Für die Geschwindigkeit von Z_0 wird vorläufig (bis zum Vorliegen des kinematischen Modells CHKM95) ein Nullvektor angenommen.

Der lokale Bezug zum Geoid wird durch die Lotabweichungen und die Geoidundulation (im System *CHTRS95*) im Fundamentalpunkt Z_0 beschrieben. Von den in Tabelle 5.2-3 angegebenen Werten wurden die orthometrische Höhe H_0 aus den Beobachtungen des Landesnivellements berechnet und schliesslich "per Definition" festgehalten (s. 5.5). Die Geoidundulation N_0 wurde aus h_0 und H_0 abgeleitet und die Lotabweichungen ξ_0 , η_0 mittels dem Geoidmodell 1998 (cm-Geoid) bestimmt (s. *Anhang A4*).

Zimmerwald Z_0: Festlegung des Bezugs (<i>CHTRS95</i>) zum Geoid im Fundamentalpunkt Z_0 (Bolzen GPS-Mast)			
Höhenbezug	orthometrische Höhe H_0	Geoidundulation N_0	System, Epoche t_0
(Ellipsoid GRS80)	897.802 7 m	49.346 3 m	<i>CHTRS95</i> , 1993.0
Lotabweichung	Nordkomponente ξ_0	Ostkomponente η_0	System, Epoche t_0
(Ellipsoid GRS80)	8.46 "	4.02 "	<i>CHTRS95</i> , 1993.0

Tabelle 5.2-3: Festlegung der orthometrischen Höhe, Berechnung der Geoidundulation (*CHTRS95*) und Berechnung der Lotabweichungen (*CHTRS95*) in Z_0

5.3 Festlegung des "lokal gelagerten" Bezugssystems *CH1903+*

Das sog. "lokal gelagerte" Bezugssystem *CH1903+* wird, wie in 4.1 beschrieben, so festgelegt, dass es in erster Näherung mit dem bisherigen Schweizerischen Datum *CH1903* übereinstimmt. Der Benutzer soll so vom Systemwechsel möglichst wenig tangiert werden. Als Bezugsellipsoid wird wie bisher bei *CH1903* das Ellipsoid von Bessel (1841) verwendet (s. *Tabelle 5.3-1*).

Bezugsellipsoid	grosse Halbachse a	Kleine Halbachse b	Abplattung $1/f$	Exzentrizität ² e^2
Bessel 1841 (wie <i>CH1903</i>)	6 377 397.15500 m	6 356 078.962 8 m	299.152 812 85	0.006 674 372 231
Lagerung	Orientierung	Massstab	Shift	
	achsparell zu <i>ETRS89/CHTRS95</i>	Identisch mit <i>ETRS89/CHTRS95</i>	Koordinaten in Z_0 (s. <i>Tabelle 5.3-2</i>)	

Tabelle 5.3-1: Definition von *CH1903+*

Zimmerwald Z_0: Festlegung der geodätischen Koordinaten (<i>CH1903+</i>) des Fundamentalpunktes (Bolzen GPS-Mast)		
$\lambda_0 = 7^\circ 27' 58.417 7''$	$\varphi_0 = 46^\circ 52' 42.270 3''$	$h_0 = 897.361 0 \text{ m (ell.) (Ellipsoid: Bessel 1841)}$
$X_0 = 4 330 616.710 \text{ m}$	$Y_0 = 567 539.793 \text{ m}$	$Z_0 = 4 632 721.686 \text{ m (CH1903+, } t_0=1993.0)$
$E_0 = 2 602 030.770 \text{ m}$	$N_0 = 1 191 775.062 \text{ m}$	(<i>CH1903+</i> , Schweiz. Landeskartenprojektion)

Tabelle 5.3-2: Fixierung des Bezugssystems *CH1903+* im Fundamentalpunkt Z_0

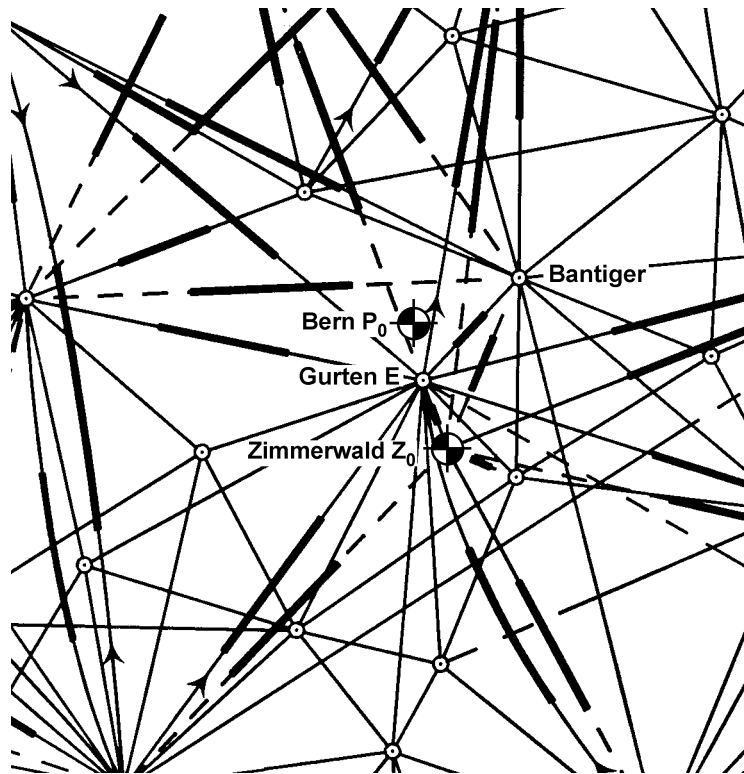


Abbildung 5.3-1: Lagebeziehung zwischen dem alten Fundamentalpunkt P_0 in Bern und dem realen Fundamentalpunkt Z_0 in Zimmerwald aus der Diagnoseausgleichung DIA95

Die Festlegung des Koordinatensystems erfolgt wie bei *CHTRS95* ebenfalls im Fundamentalpunkt Z_0 in Zimmerwald, wobei die Bedingungen der Parallelität der Koordinatenachsen und des identischen Massstabs bezüglich *CHTRS95* (und *ETRS89*) gefordert wird und zudem die alten Ausgangswerte (s. *Tabelle 4.3-1*) im ideellen Fundamentalpunkt (alte Sternwarte Bern) so exakt wie möglich beibehalten werden. Dies hat zur Folge, dass sich die beiden Koordinatensysteme zum Zeitpunkt $t_0 = 1993.0$ lediglich durch eine Translation unterscheiden.

Die Differenzen in den geodätischen Koordinaten (geodät. Länge λ_0 , geodät. Breite φ_0) von Zimmerwald (Z_0) gegenüber der alten Sternwarte Bern (P_0) wurde aus dem aktuellsten Netz der Triangulation 1. und 2. Ordnung (Diagnoseausgleichung DIA95 [Chablais et al., 1988 und 1995]; Version mit GPS-Koordinaten aus LV95 [Schneider et al., 1996]) berechnet (s. *Anhang A4*). Als Ersatz für den nicht mehr für Vermessungen zugänglichen alten ideellen Fundamentalpunkt P_0 wurde dabei der am nächsten gelegene TP 1. Ordnung "Gurten E" mit seinen offiziellen LV03-Koordinaten als Ausgangspunkt verwendet. Für den realen Fundamentalpunkt Zimmerwald (Z_0) ergeben sich damit und unter Berücksichtigung der Exzentrizität des RETrig-Punktes (CH99) die in *Tabelle 5.3-2* angegebenen geodätischen Lagekoordinaten im System *CH1903+*, welche hiermit "per Definition" festgelegt werden und folglich als "Konstanten" zu betrachten sind. Im Gegensatz zu *CHTRS95* wird *CH1903+* als statisches System, "eingefroren" auf die Epoche $t_0 = 1993.0$, betrachtet. Die Festlegung eines eigenen kinematischen Modells für *CH1903+* erübrigt sich daher.

Die ellipsoidische Höhe h_0 von Z_0 im System *CH1903+* wurde durch die folgenden Berechnungsschritte bestimmt (s. *Anhang A4*):

1. Berechnung der orthometrischen Höhe H von Z_0 aus der vorläufigen kinematischen Ausgleichung des Landesnivellements ausgehend vom ideellen Ausgangspunkt RPN mit $H = 373.600$ m in Genf. Dieser Wert wird im Rahmen der Festlegung des Höhensystems (s. 5.5) schliesslich "per Definition" festgehalten.
2. Berechnung der Geoidundulation N in Z_0 (im *CH1903+*) mit Hilfe des Geoidmodells CHGEO98. Dabei wird die bisherige Festlegung: $N=0$ im ideellen Punkt S_0 in Schwerzenbach als Ausgangswert übernommen und N_0 in Zimmerwald Z_0 schliesslich "per Definition" festgehalten.
3. Berechnung der ellipsoidischen Höhe h_0 von Z_0 mit $h_0 = H_0 + N_0$

Die Berechnung der Lotabweichungen im Schweizer Datum *CH1903+* aus der Geoidberechnung 1998 (cm-Geoid) ergibt für den Punkt Z_0 die in Tabelle 5.3-3 angegebenen Werte (s. *Anhang A4*).

Zimmerwald Z_0: Festlegung des Bezugs (<i>CH1903+</i>) zum Geoid im Fundamentalpunkt Z_0 (Bolzen GPS-Mast)			
Höhenbezug	orthometrische Höhe H_0	Geoidundulation N_0	System, Epoche t_0
(Ellipsoid Bessel 1841)	897.906 3 m	- 0.545 3 m	<i>CH1903+</i> , 1993.0
Lotabweichung	Nordkomponente ξ_0	Ostkomponente η_0	System, Epoche t_0
(Ellipsoid Bessel 1841)	3.73 "	1.68 "	<i>CH1903+</i> , 1993.0

Tabelle 5.3-3: Festlegung der orthometrischen Höhe und der Geoidundulation und Berechnung der Lotabweichungen (*CH1903*) im Fundamentalpunkt Z_0

5.4 Koordinatentransformation *CHTRS95* $\leftrightarrow$ *CH1903+*

Die Festlegung der beiden Systeme *CHTRS95* und *CH1903+* im gleichen realen Fundamentalpunkt Z_0 erlaubt einen sehr einfachen Übergang zwischen diesen beiden Systemen. Die geozentrischen Koordinaten der beiden Systeme (s. *Tabelle 5.2-2* und *Tabelle 5.3-2*) unterscheiden sich infolge der Parallelität der Achsen lediglich durch eine einfache Translation:

$$\mathbf{D} = (dX, dY, dZ) = (\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})_{CH1903+} - (\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})_{CHTRS95} \quad (5.4-1)$$

Die Parameter $\mathbf{D}$ in *Tabelle 5.4-1* ergeben sich mit beliebiger Rechenschärfe aus den per Definition festgelegten geodätischen Koordinaten von Z_0 im *CHTRS95* bzw. im *CH1903+* (s. *Anhang A4*).

Zimmerwald Z_0: Translation im Fundamentalpunkt (Bolzen GPS-Mast)	
dX_0	- 674.374 m
dY_0	- 15.056 m
dZ_0	- 405.346 m

Tabelle 5.4-1: Parameter der regulären Transformation *CHTRS95* $\leftrightarrow$ *CH1903+*

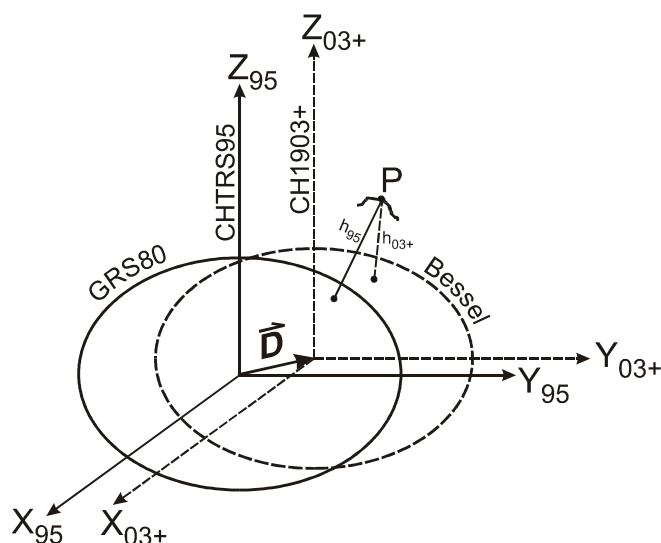


Abbildung 5.4-1: Geometrische Beziehung *CHTRS95* $\leftrightarrow$ *CH1903+*

5.5 Festlegung der Höhenbezugssysteme von LV95

In Übereinstimmung mit dem Konzept der dualen Systemwahl (globale / lokale Lagerung) werden auch beim Höhenbezug zwei unterschiedliche Festlegungen vorgeschlagen. Als ideeller Fundamentalpunkt wird für das "lokal gelagerte" System *CH1903+* der Ausgangspunkt: Repère Pierre du Niton (RPN) mit seiner offiziellen Höhe von 373.600 m (RPN, neuer Horizont, 1902; s. Kap. 3.3) beibehalten und dieser Wert als orthometrische Ausgangshöhe betrachtet. Die Höhe des realen Fundamentalpunktes Z_0 wird in Analogie zur Lage mittels einer strengen Berechnung der orthometrischen Höhendifferenz aus den Messungen des Landesnivellements abgeleitet (s. *Anhang A4*). Das 'strenge' orthometrische Höhensystem wird für den Zeitpunkt $t_0 = 1993.0$ als statisch betrachtet und damit die Verwaltung der Höhenwerte für die AV vereinfacht. Bei der Verwendung von alten ($t \ll 1993$) und zukünftigen Messungen ($t \gg 1993$) müssen auch in diesem System kinematische Korrekturen angebracht werden.

Mit der Festlegung der orthometrischen Höhe H_0 im realen Fundamentalpunkt Z_0 in Zimmerwald wird das Höhensystem (zu *CH1903+*) und damit der Höhenbezugsrahmen LHN95 für das neue Landeshöhennetz LHN95 (s. 6.5) neu definiert. Aufgrund der 1995 erfolgten Anschlussmessung der Station Zimmerwald ans Landesnivellement und der Berechnung der orthometrischen Höhendifferenz Genf - Zimmerwald (s. *Anhang A4*) kann gleichzeitig garantiert werden, dass die neue Festlegung des Höhen datums im System *CH1903+* mit der ursprünglichen (Ausgangspunkt RPN 1902) im Rahmen der Messgenauigkeit kompatibel ist. Als orthometrische Höhe für den realen Fundamentalpunkt Z_0 in Zimmerwald wird der folgende "beobachtete" Wert festgehalten:

Zimmerwald (Z_0): **orthometrische Höhe:** $H_0 = 897.906\ 3\ \text{m}$ (*CH1903+*; $t_0=1993.0$)

Als Ergänzung zum "global gelagerten" System *CHTRS95* wird ein zweites, strenges Höhensystem vorgeschlagen, das jedoch ans europäische Nivellementsnetz UELN angeschlossen wird. Es soll primär wissenschaftlichen Zielen dienen und zudem den Höhenbezug zu den europäischen Höhen netzen und damit zu jenen der Nachbarländer herstellen. In Übereinstimmung mit dem UELN werden primär geopotentielle Koten C [GPU¹] festgelegt und ausgeglichen und daraus entweder strenge ortho metrische Höhen und/oder Normalhöhen abgeleitet. Das System soll zudem grundsätzlich als kinema tisches System mit zugehörigem diskretem Geschwindigkeitsmodell angelegt werden. Als Ausgangs punkt wird wiederum der Fundamentalpunkt in Zimmerwald Z_0 betrachtet und seine geopotentielle Kote sowie seine orthometrische Höhe bzw. Normalhöhe vom Knotenpunkt des UELN (Lösung 1986; Epoche 1975.0) in Olten (FP C = SO 85) abgeleitet (s. *Anhang A4*).

Zimmerwald (Z_0): **Potential:** $C_0 = 880.345\ 9\ \text{GPU}$ (*CHTRS95*, $t_0=1993.0$)

orthometrische Höhe: $H^0_0 = 897.802\ 7\ \text{m}$ (*CHTRS95*, $t_0=1993.0$)

Normalhöhe: $H^n_0 = 897.715\ 4\ \text{m}$ (*CHTRS95*, $t_0=1993.0$)

Die Realisierung der Höhensysteme im Rahmen des Projektes LHN95 (als Teil der neuen Landesvermessung LV95) wird in Kap. 6.5 beschrieben.

¹ 1 GPU = $10\text{m}^2\ \text{sec}^{-2}$ = 10^6 mgal m

6 Global und lokal gelagerte Bezugsrahmen CHTRF95 und LV95

6.1 Realisierung des global gelagerten Bezugsrahmens CHTRF95

Bei der Konzeption der neuen Schweizerischen Landesvermessung LV95 wurde dem Anschluss des neuen GPS-Grundlagenetzes an einen globalen Bezugsrahmen eine grosse Bedeutung beigemessen. Das Netz wurde durch wiederholte GPS-Messungen sowohl an die Geostation Zimmerwald wie auch an die übrigen 4 EUREF-Stationen an der Peripherie der Schweiz angeschlossen (*Abbildung 4.2-1*). Mit dem Vorliegen des offiziellen Koordinatensatzes *EUREF89* seit Frühjahr 1992 wären die Voraussetzungen für die Integration von LV95 in *EUREF89* und damit indirekt in den *ETRF89*-Bezugsrahmen als Realisierung von *ETRS89* gegeben. Die Genauigkeit des schweizerischen EUREF-Teilnetzes wurde jedoch anlässlich von *Epoch'92* (IGS) durch zusätzliche Messungen (EUREF-CH92) und das nördliche Dreieck Zimmerwald - Chrischona - Pfänder im Rahmen von EUREF-D/NL93 wesentlich verbessert [*Wiget, 1996*].

Mit *ETRF93* (bezogen auf Epoche 1989.0) liegt ein Bezugsrahmen für die 'IERS fiducials' vor, welcher bezüglich der Positionsgenauigkeit dem früheren Datensatz *ETRF89* überlegen ist. Weit schwieriger als die Positionsbestimmung ist die Bestimmung der 'absoluten' Geschwindigkeitsvektoren der 'fiducials' (im *ITRS*), welche bei der Epochen-Transformation von der Beobachtungs- zur Bezugsepoche (s. *Abbildung 6.1-1*) eine wichtige Rolle spielen. Deshalb scheint es sinnvoll, für LV95 einen übergeordneten Bezugsrahmen mit einer Referenzepoche t_0 zu wählen, welche etwa dem Schwerpunkt der LV95-Beobachtungsepochen auf der Zeitachse entspricht. Dies trifft für *ETRF93* zu, da die wichtigsten Beobachtungsdaten in LV95 aus den Teilnetzen EUREF-CH92 und EUREF-D/NL93 bestehen und die übrigen GPS-Messepochen über die Jahre 1988 bis 1994 verteilt sind.

Durch die kombinierte Ausgleichung des GPS-Landesnetzes LV95 bestehend aus den Teilen EUREF-CH92, EUREF-D/NL93 und den 6 Teilnetzen N-CH88, LV95-89, LV95-90, LV95-91, LV95-92 und LV95-94 [*Vogel et al., 1996*] bei gleichzeitiger Lagerung in die 'IERS fiducials' (z.B. Zimmerwald, Wettzell und Graz) mit *ETRF93*-Koordinaten [*Gubler and Schneider, 1994*] entsteht ein von dem *ETRF89* Bezugsrahmen unabhängiger Datensatz, welcher unter der Bezeichnung *CHTRF95* als terrestrischer Bezugsrahmen für die neue Landesvermessung LV95 gilt. Dieser ist kompatibel mit *ETRF93* zur Epoche 1993.0 und wurde über die Transformationsformeln *ITRS93* → *ETRS89* [*Boucher and Altamimi, 1995*] in das System *ETRS89* überführt. Er weicht erwartungsgemäss wenige cm vom Datensatz *EUREF89* ab [*Wiget et al., 2001*]. Für die 5 EUREF Stationen wurden die so bestimmten Koordinaten von EUREF 1996 offiziell als *ETRS89* Koordinaten akzeptiert [*Wiget, 1996*].

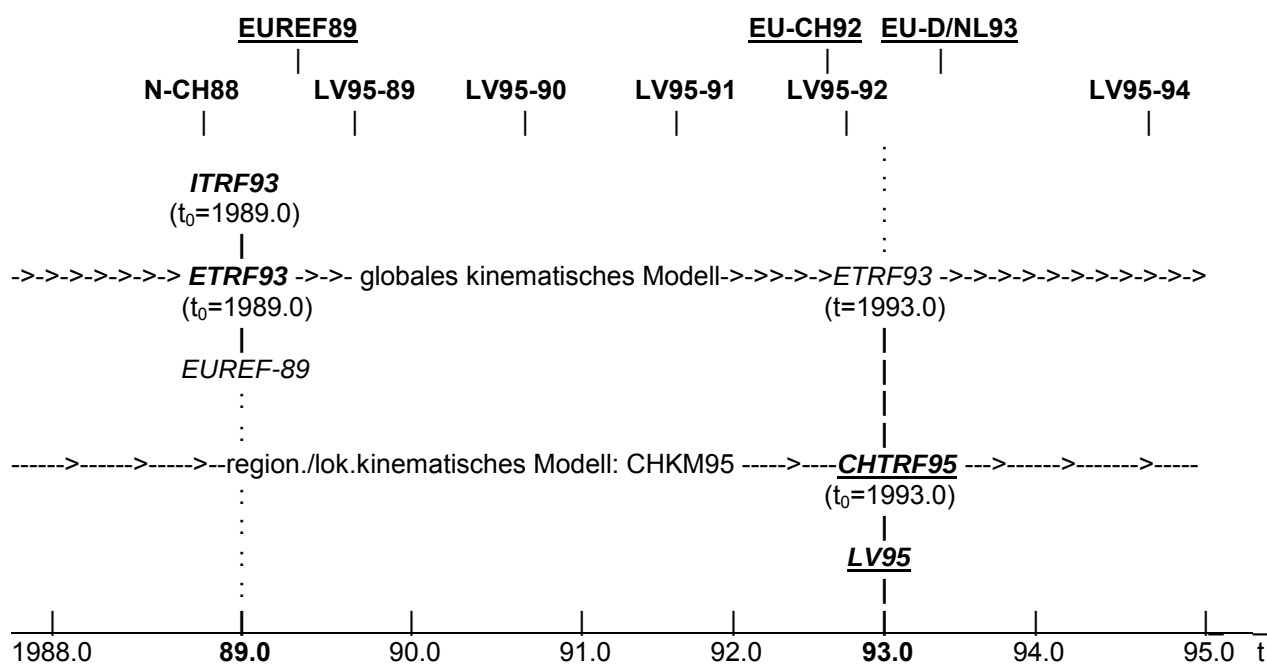


Abbildung 6.1-1: GPS-Messungen und Referenzepochen der Bezugsrahmen in der Zeitdomäne

6.2 Kinematische Daten zu CHTRF95

Da zurzeit noch keine genügenden Informationen über die horizontalen Komponenten der relativen Bewegungen der obersten Kruste in der Schweiz vorhanden sind, ist eine abschliessende Bestimmung des kinematischen Modells noch nicht möglich. Immerhin sind erhärtete Erkenntnisse über die vertikalen Relativbewegungen aus der kinematischen Analyse des Landesnivellements gesichert. Danach treten bei repräsentativen Felspunkten relative Geschwindigkeitsvektoren in der Grössenordnung von maximal 1-2 mm/Jahr mit hoher räumlicher und zeitlicher Kontinuität auf [Gubler et al., 1984]. Aufgrund der begrenzten Kenntnis der vorhandenen Charakteristik der Relativbewegungen im Raum scheint es sinnvoll, das kinematische Modell durch ein diskretes, 3-dimensionales Geschwindigkeitsfeld zu parametrisieren. Diese Lösung hat sich im eindimensionalen Fall des Höhensystems (kinematische Ausgleichung des Landesnivellements) bereits seit Jahren bewährt. Dieselbe Modellierung wird auch im Falle des Projekts LHN95 angewendet.

Im nördlichen Teil des Netzes wurden im Herbst 1995 im Rahmen eines Projektes der *Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)*¹ 15 LV95-Punkte und 13 weitere Kontrollpunkte mit GPS nachgemessen. Die Erstmessung dieses GPS-Netzes *Neotektonik Nordschweiz* erfolgte 1988 [Wiget et al., 1991]. Eine erste Grobanalyse der Ergebnisse dieser Messungen ergab für das Untersuchungsgebiet und die kurze Zeitspanne keine Hinweise auf signifikante Bewegungen [Wiget et al., 1996]. Im Alpenraum sind allerdings grössere Relativbewegungen von bis zu 2mm/Jahr zu erwarten (siehe Teil 1 dieser Reihe [Schneider et al., 1995]). Aufgrund dieser Überlegungen wurde abgeschätzt, in welchen Intervallen regelmässige Neumessung des Landesnetzes sinnvoll und notwendig sein werden. Bei der heute möglichen Messgenauigkeit scheint ein Wiederholungsintervall von ca. 7 Jahren angemessen zu sein. Bei der Analyse von Zeitreihen aus permanenten GPS-Netzen (z.B. IGS, EUREF-Permanentnetz oder AGNES) lassen sich allerdings schon aus wesentlich kürzeren Beobachtungsintervallen signifikante Horizontalbewegungen nachweisen [Brockmann, 1997].

Die erste flächendeckende Nachmessung des LV95-Netzes erfolgte im Herbst 1998 [Wiget, 2001]. Während einer insgesamt sieben Wochen dauernden Messepoche wurden 194 Stationspunkte (10 permanente AGNES-Stationen, 105 LV95-Hauptpunkte, 15 GPS-Punkte in den Nachbarländern und 64 LV95-Verdichtungspunkte) neu gemessen. Die Auswertung der Messungen erfolgte 1999 [Brockmann et al., 2001] und ergab den Koordinatensatz CHTRF98. Aus den ersten Vergleichen zwischen CHTRF95 und CHTRF98 konnte zwar die hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der beiden Datensätze, zumindest in Bezug auf die Lagegenauigkeit, nachgewiesen werden. Ein Nachweis von signifikanten Horizontalbewegungen ist bis heute jedoch noch nicht gelungen. Die Bildung eines kinematischen Modells CHKM95 bleibt daher als interessante Aufgabe für die Zukunft pendend.

6.3 Realisierung des lokal gelagerten Bezugsrahmens LV95

Durch Datumstransformation ($CHTRS95 \rightarrow CH1903+$) des Koordinatensatzes CHTRF95 ($t_0 = 1993.0$) mit den in 5.4 beschriebenen Parametern (Tabelle 5.4-1) entsteht der lokale Bezugsrahmen LV95 [Wiget et al., 2001] als Realisierung des Terrestrischen Bezugssystems CH1903+. Die geozentrisch-kartesischen Koordinaten der LV95-Hauptpunkte und der bereits vorhandenen LV95-Verdichtungspunkte werden mit Hilfe von Standard-Prozeduren (Programm GEOREF) in einem ersten Schritt in geodätische Koordinaten und schliesslich in LV95-Landeskoordinaten umgerechnet. Dieser Koordinatensatz ist jedermann zugänglich und wird in der Form von LV95-Punktprotokollen [Vogel et al., 1998] herausgegeben.

Um neben den Koordinaten der neuen LV95-Punkte des GPS-Landesnetzes auch LV95-Koordinaten aller TP 1./2. Ordnung zu erhalten, wurden 2D- und 3D-Gesamtausgleichungen des Diagnosenetzes (DIA95) der Triangulation 1./2. Ordnung [Chablais et al., 1995] mit dem GPS-Landesnetz (LV95) im Bezugssystem CH1903+ berechnet.

6.4 Anwendung der neuen Bezugsrahmen

Der Bezugsrahmen CHTRF95 findet vor allem für wissenschaftliche Anwendungen (Geowissenschaften) aber auch bei grösseren Projekten der Ingenieurvermessung (Projekte BAHN2000 und AlpTransit etc.) Verwendung. Neben der hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Koordinaten werden sich bei diesem Koordinatensatz vor allem das kinematische Modell und die zusätzliche stochastische Information sowie die Kompatibilität mit anderen Bezugssystemen in Europa als Vorteil erweisen.

¹ Neotektoniknetz Nordschweiz 1988/95 der NAGRA

Die Bedeutung des Bezugsrahmens LV95 liegt vor allem im Bereich der Amtlichen Vermessung. Wie aus einer vorliegenden ersten Lösung DIA95 im Bezugssystem CH1903+ und bei deren Vergleich mit den offiziellen Koordinaten (LV03) festgestellt wurde, ist als Folge der Umstellung der Landesvermessung auf den neuen Bezugsrahmen LV95 (im System CH1903+) landesweit mit Koordinaten-Änderungsbeträgen $< \text{ca. } 1.6 \text{ m}$ zu rechnen (s. *Abbildung 6.4-1*). Für den Benutzer der Landeskarten 1:25'000 und aller kleineren Massstäbe liegen diese Änderungsbeträge somit in einer Grössenordnung ($< 0.06 \text{ mm}$ in der Karte), welche gerade noch vernachlässigt werden kann. Bei den Plänen und raumbezogenen Daten der AV werden bei einer Einführung des neuen Bezugsrahmens langfristig Anpassungen in Lage und Höhe notwendig sein.

Die Verwendung des LV95-Rahmens bringt langfristig auch für die AV Vorteile, indem dank der neuen zwangsfreien LV95-Grundlage zukünftig jegliche Interpolation und Einzwängung in bestehende Netze hinfällig werden. Daneben ermöglicht die hohe Absolutgenauigkeit die Anwendung neuer rationeller Positionierungsverfahren über grössere Entfernungen, wie 'real time kinematic GPS (RTK)', oder in Zukunft sogar mit aktiven Kontrollpunkten (permanente GPS-Stationen), wie etwa im Projekt 'Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES)' [Wild et al., 2001].

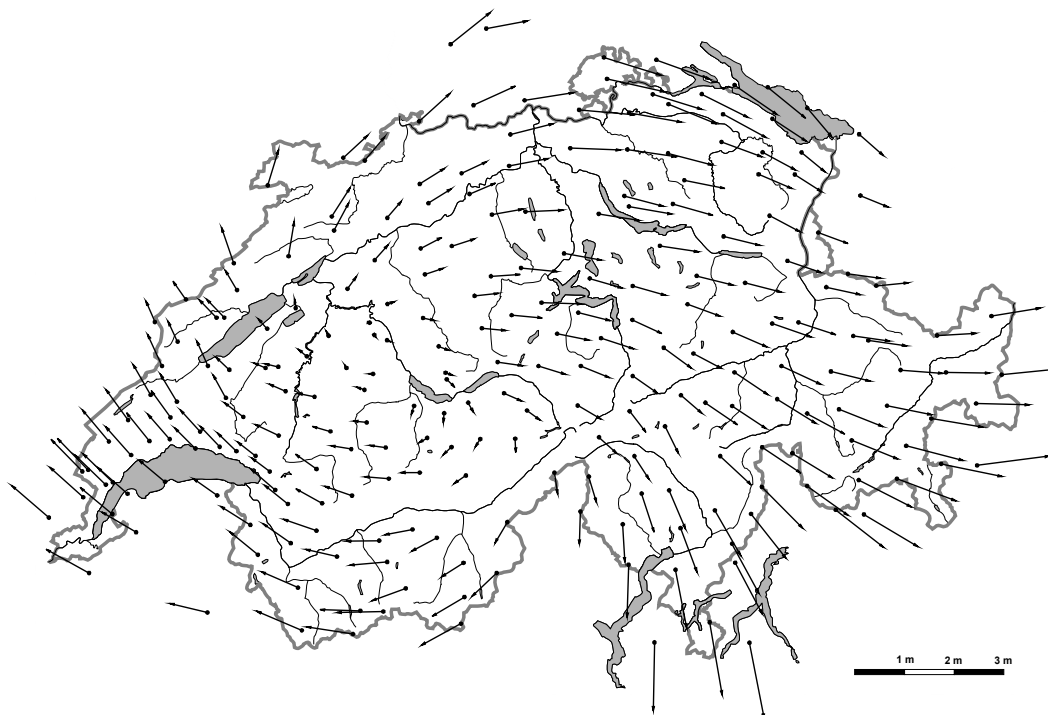


Abbildung 6.4-1: Koordinatendifferenzen: Offizielle Koordinaten LV03 → LV95 (DIA)

6.5 Neues Landeshöhennetz LHN95

Der Aufbau hochgenauer Höhennetze im alpinen Raum stellt immer noch eine besondere geodätische Herausforderung dar. Mit dem Aufbau des neuen Landeshöhennetzes LHN95 wird auch in diesem Bereich der Landesvermessung ein wesentlicher Schritt in die Zukunft eingeleitet. Neben den bereits in den vorhergehenden Kapiteln behandelten Aspekten der Modellierung von Kinematik und Schwerefeldeinflüssen, wird der kombinierten Ausgleichung von Nivellements- und GPS-Messungen und den damit verbundenen Problemen besondere Bedeutung zugemessen. Entsteht doch dadurch die Möglichkeit, bisher schlecht kontrollierbare systematische Fehlereinflüsse bei langen Nivellementslinien durch unabhängige GPS-Messungen zu überprüfen. Voraussetzung dazu sind allerdings von systematischen Fehlern (troposphärische Refraktion der Mikrowellen etc.) weitgehend befreite ellipsoidische Höhendifferenzen aus den GPS-Netzen.

Wie in 4.4 und 5.5 ausgeführt, soll zum "global gelagerten" Bezugssystem CHTRS95 auch ein "global gelagertes" Höhensystem mit Anschluss ans UELN (und später evtl. ans EVS2000) verwendet werden. Im Unterschied zum Höhensystem im CH1903+ soll dieses System durch den Einbezug des kinematischen Modells CHKM95 ein diskretes Geschwindigkeitsfeld enthalten und damit dem Benutzer auf Wunsch zeitabhängige Höhen liefern. Als Realisierung dieses Systems ist der Höhenbezugsrahmen

CHVRF95 zu betrachten, der eine strenge kinematische Neuausgleichung des bisherigen Landesnivellements mit Einbezug des daran angeschlossenen GPS-Landesnetzes *LV95* beinhaltet. Dazu sind die folgenden Rechenschritte vorgesehen:

1. Kinematische Ausgleichung der Landesnivellements-Daten (Nivellement und Schwere). Als Unbekannte Parameter werden dabei geopotentielle Koten C [GPU] zu einem Referenzzeitpunkt t_0 und ihre zeitlichen Ableitungen dC/dt [GPU/Jahr] geschätzt.
2. Lagerung des Netzes im Fundamentalpunkt Zimmerwald Z_0 mit dem vom *UELN* abgeleiteten Ausgangswert C_0 (s. 4.4).
3. Gesamtausgleichung des Datensatzes *CHVRF95* ($t_0 = 1993.0$) mit dem *CHTRF*-GPS-Datensatz (jeweils mit zugehöriger Kovarianzinformation) unter Verwendung des Geoidmodells *CHGEO98*. (Die ellipsoidischen GPS-Höhen werden mittels Geoidmodell zuerst in orthometrische Höhen und darauf in Geopotentialwerte [GPU] umgerechnet.)
4. Berechnung von orthometrischen Höhen mit gemessenen bzw. interpolierten Oberflächen-Schwerewerten und daraus extrapolierten mittleren Schwerewerten in der Lotlinie [Wirth, 1990].

Um Verwechslungen mit anderen Höhenwerten zu vermeiden, sollen die Ergebnisse dieser Berechnung intern in Form von Geopotentialwerten [GPU] verwaltet und nicht publiziert werden. Für spezielle Anwendungen (z.B. Ingenieurvermessungen) können aus diesen Daten aber jederzeit entweder orthometrische Höhen oder Normalhöhen mit speziell definiertem Werkhöhendatum abgeleitet werden. Die Forderung, dass die Daten der modernen Landesvermessung auch den hohen Anforderungen an die Grundlagenvermessungen grosser Ingenieurprojekte genügen sollen, kann damit erfüllt werden.

Zum lokalen Bezugssystem *CH1903+* und dem Bezugsrahmen *LV95* wird ein anderes Höhensystem bzw. Höhendatum (*LHN95*) definiert, welches das bisherige Gebrauchshöhensystem bzw. -datum *LN02* auch für die AV mittel- bis langfristig ersetzen könnte. Der Datensatz *LHN95* entsteht aus dem Datensatz *CHVRF95* durch Veränderung des Ausgangswertes H_0 im Fundamentalpunkt Zimmerwald Z_0 . Der lokale Bezugsrahmen soll statisch sein.

Das neue Höhendatum *LHN95* wird im Mittelland nur um wenige cm (bis max. 1.5 dm) von den bisherigen Gebrauchshöhen abweichen (*Abbildung 4.4-1*). Die Einführung der neuen Höhen in die AV muss natürlich simultan mit dem Übergang *LV03* → *LV95* erfolgen.

Höhenbezugsrahmen der neuen Landesvermessung LV95		
Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen:	Globale Lagerung	Lokale Lagerung
Räumlicher Bezug: 3D-Bezugssystem 3D-Bezugsrahmen	<i>CHTRS95</i> <i>CHTRF95</i>	<i>CH1903+</i> <i>LV95</i>
Höhenbezug: Höhenbezugsrahmen Höhen- / Potentialwerte Abgeleitete Grössen	<i>CHVRF95</i> Geopotentielle Koten [GPU] - Orthometrische Höhen [m] - Normalhöhen [m]	<i>LHN95</i> Orthometrische Höhen [m] - Geopotentielle Koten [GPU] - Normalhöhen [m]
Kinematik: Kinematisches Modell Potentialrate ("Geschwindigkeit") Abgeleitete Grössen	<i>CHKM95</i> dC/dt : [mGPU / J] dH/dt [mm / J]	keines (mit $t_0 = 1993.0$ festgehalten) keine keine

Tabelle 6.5-1: Übersicht der Höhenbezugsrahmen

7 Übergänge zwischen den lokalen Bezugsrahmen

7.1 Bisherige Übergänge zwischen globalen und lokalen Bezugsrahmen

Mit der Einführung von GPS in der allgemeinen Vermessungspraxis entstand auch ein Bedürfnis nach einer einfachen und möglichst genauen Transformation von Koordinaten im lokalen Bezugssystem CH1903 (Bezugsrahmen: LV03) in das globale Bezugssystem WGS84 des GPS. Die L+T hat deshalb 1989 einen Parametersatz (7 Parameter) für eine direkte räumliche Ähnlichkeits-Transformation CH1903 $\leftrightarrow$ WGS84 (s. Formel 7.1-1 und Tabelle 7.1-1) bereitgestellt und veröffentlicht [Rothacher et al., 1993; L+T, 1990].

$$\underline{X} = \underline{dX} + s \underline{D} \underline{X'} \quad (7.1-1)$$

Dabei bedeuten:

$\underline{X}$ (X, Y, Z) WGS84 Koordinaten
 $\underline{X'}$ (X', Y', Z') lokale relativgeozentrische Koordinaten
 $\underline{dX}$ (dX, dY, dZ) Translationsvektor im X, Y, Z-System
s Massstabsfaktor

Drehmatrix $\underline{D} = \underline{R}_{3\gamma} \cdot \underline{R}_{2\beta} \cdot \underline{R}_{1\alpha} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$

mit:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos\beta \cos\gamma \\ r_{21} &= -\cos\beta \sin\gamma \\ r_{31} &= \sin\beta \\ r_{12} &= \cos\alpha \sin\gamma + \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma \\ r_{22} &= \cos\alpha \cos\gamma - \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma \\ r_{32} &= -\sin\alpha \cos\beta \\ r_{13} &= \sin\alpha \sin\gamma - \cos\alpha \sin\beta \cos\gamma \\ r_{23} &= \sin\alpha \cos\gamma + \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma \\ r_{33} &= \cos\alpha \cos\beta \end{aligned}$$

Dabei sind die Winkel α , β , γ die (mitgedrehten) Drehwinkel um die drei Koordinatenachsen X'(1), Y'(2), und Z'(3).

Transformationsparameter CH1903 $\leftrightarrow$ WGS84			
Parameter			m.F.
Translationen:	dX	660.077 m	4.055 m
	dY	13.551 m	4.816 m
	dZ	369.344 m	3.914 m
Massstabsfaktor:	s	1.000'005'66	0.000'000'52
Drehwinkel:	α	2.484 cc	0.417 cc
	β	1.783 cc	0.455 cc
	γ	2.939 cc	0.411 cc

Tabelle 7.1-1: GRANIT-Parametersatz

Die Parameter wurden mit Hilfe einer räumlichen Helmert-Transformation (Programm ATRA) [Schmid und Heggli, 1978] geschätzt, wobei einerseits die offiziellen LV03-Koordinaten von 12 trigonometrisch bestimmten Punkten und andererseits die globalen Koordinaten (BTS87 $\sim$ WGS84) aus der ersten landesweiten GPS-Kampagne GRANIT87 [Beutler et al., 1989] als Stützpunkte verwendet wurden. Die

Gebrauchshöhen wurden vorgängig mit Hilfe des Gurtner-Geoidmodells in ellipsoidische Höhen umgerechnet.

Verschiedene Anwendungen dieser Transformationsparameter weisen darauf hin, dass sich mit dieser Transformation (und mit Berücksichtigung des Gurtner-Geoids) in der ganzen Schweiz WGS84-Koordinaten aus Landeskoordinaten mit einer Genauigkeit (1 Sigma) von besser als 1 m berechnen lassen. Aufgrund der Verzerrungen in LV03, welche aus dem in Abbildung 6.4-1 gezeigten Vektorfeld der Koordinatendifferenzen deutlich erkennbar sind, ist es offensichtlich, dass auch eine neue Helmert-Transformation aufgrund der LV95-Resultate keinen wesentlich besseren Parametersatz für eine räumliche Ähnlichkeitstransformation von LV03 in die globalen Bezugsrahmen ergeben würde. Damit ein möglichst genauer Übergang realisiert werden kann, wird eine Modellierung der vorhandenen Verzerrungen im LV03-Bezugsrahmen in Lage und Höhe benötigt. Zukünftig wird der Übergang von globalen *CHTRF*-Koordinaten ($\sim$ WGS84) in LV03-Koordinaten (*CH1903*) dann schrittweise mit den beiden Transformationen

- 1) räumliche Translation: *CHTRF* $\rightarrow$ *LV95* und
- 2) Transformation mit Verzerrungsmodell: *LV95* $\rightarrow$ *LV03*

und mit Berücksichtigung des neuen cm-Geoids erfolgen.

7.2 LV03 $\Leftrightarrow$ LV95

Die Transformation von Koordinaten vom alten (*LV03*) in den neuen Bezugsrahmen *LV95* und umgekehrt hat für die praktische Vermessung und namentlich für die riesige Punktmenge der amtlichen Vermessung eine grosse Bedeutung. Eine Umstellung der amtlichen Vermessung auf den neuen Bezugsrahmen *LV95* ist möglich, falls eine Transformationsmethode für diesen Übergang angeboten wird, welche das komplexe Verzerrungsbild mit genügender Feinheit zu modellieren vermag.

In Zusammenarbeit mit dem IGP-ETHZ wurde für dieses Problem eine praktikable Lösung gefunden. Dabei wird eine Transformation nach finiten Elementen (Programm *FINELTRA*) vorgesehen, welche auf Affintransformationen innerhalb von vordefinierten Dreiecken basiert [Carosio und Plazibat, 1995]. Für eine ausführliche Darstellung der gewählten Methode sei auf Teil 9 [Signer und Vogel, 1999] aus dieser Reihe verwiesen. Eine erste Stufe dieser Transformation für die LV liegt mit dem entsprechenden Datensatz inzwischen vor, so dass der Übergang *LV03* $\Leftrightarrow$ *LV95* in erster Näherung (mit dm-Genauigkeit) erfolgen kann.

7.3 LN02 $\Leftrightarrow$ LHN95

Die Ausführungen zur Transformation der Lagekoordinaten in 7.2 gelten in ähnlicher Weise auch für die Umwandlung von alten Gebrauchshöhen (*LN02*) in orthometrische Höhen (*LHN95*) und umgekehrt. Die in Abbildung 4.4-1 angegebenen Abschätzungen der Höhenänderungen bei Einführung des orthometrischen Höhenbezugsrahmens *LHN95* beschreiben die Problemstellung im Überblick. Auch im *LN02* sind aber beträchtliche Verzerrungen enthalten. Die Methode für die Modellierung dieses Feldes der Höhenverzerrungen wird nach ähnlichen Prinzipien erfolgen wie jene der Lage. Die konkrete Entwicklung der Methoden und der Software ist z.Z. im Gange.

Literatur

- AdV (Ed.) (1995): Deutsches Haupthöhennetz 1992 (DHHN92). *Veröffentlichung der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)*, Bayerisches Landesvermessungsamt, München.
- Alberda, J.E. (1963): Report on the Adjustment of the United European Levelling Net and Related Computations. *Publications on Geodesy, New Series*, Vol.1, No.2, Netherland Geodetic Commission, Delft 1963.
- Barzaghi, R., M.A. Brovelli and G. Sona (1996): The new Italian quasigeoid: ITALGEO95. *Bollettino di Geodesia e Science Affini*, Nr.1, 1996.
- Beutler, G., W. Gurtner, M. Rothacher and U. Wild (1989): The Swiss 1987 GPS campaign experiences in medium size networks. First International Workshop: On the Geodesy for the Europe-Africa Fixed Link Feasibility Studies in the Strait of Gibraltar, Madrid, Spain, March 1989.
- Beutler, G., I. Mueller, R. Neilan und R. Weber (1994): IGS - Der Internationale GPS-Dienst für Geodynamik. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 5/1994, pp.221-232.
- Bolliger, J. (1967): Die Projektionen der schweizerischen Plan- und Kartenwerke. Druckerei Winterthur AG, Winterthur.
- Boucher, C. and Z. Altamimi (1989): The initial IERS Terrestrial Reference Frame. *IERS Technical Note No. 1*.
- Boucher, C. and Z. Altamimi (1992): The EUREF Terrestrial Reference System and its first realisations. In Gubler E., K. Poder and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.1 (Heft 52), p.205-212. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München 1992.
- Boucher, C. and Z. Altamimi (1995): Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. In Gubler E. and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication No.4 (Heft 56), p.265-267, München 1995.
- Boucher, C. (1995): personal communication
- Brockmann, E. (1997): Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System (GPS). *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Band 55, Zürich 1997.
- Brockmann, E., Th. Signer und A. Wiget (2001): LV95-CHTRF98: GPS-Messungen 1998: Auswertung der Messungen und Beurteilung der Resultate. Technischer Bericht 98-16 (in prep.).
- Carosio, A. und M. Plazibat (1995): Lineare Transformation mit finiten Elementen - eine anpassungsfähige Verbindung zwischen alter und neuer Landesvermessung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 4/95.
- Chablais, H., E. Gubler, D. Schneider und A. Wiget (1988): Die geodätische Landesvermessung in der Schweiz, heute und morgen, *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 4/1988.
- Chablais, H., Th. Signer und B. Vogel (1995): Aufbau der Landesvermessung der Schweiz 'LV95', Teil 4, Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung: 'DIA93'. *Berichte aus der L+T Nr. 9*, Wabern.
- Ehnsperger, W. and J.J. Kok (1986): Status and Results of the 1986 Adjustment of the United European Levelling Network - UELN - 73. *Symposium on Height Determination and Recent Crustal Movements in Western Europe*, University of Hannover, 15. - 19. September, 1986. Dümmler's Verlag, Bonn.
- Gubler, E., D. Schneider und P. Kellerhals (1984): Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. *Technischer Bericht 84-17 der NAGRA*, Baden.
- Gubler, E., K. Poder and H. Hornik (1992a): Resolutions. In Gubler E. and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.1 (Heft 52), p.94-95, München 1992.

- Gubler, E., K. Poder and H. Hornik (1992b): Resolutions. In Gubler E. and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.1 (Heft 52), p.262-263, München 1992.
- Gubler, E. and D. Schneider (1994): Propositions for defining a modern national geodetic reference frame. In Gubler E. and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.3 (Heft 54), p.162-164, München 1994.
- Gurtner, W. (1978): Das Geoid in der Schweiz. *Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz*, Band 32, Bern 1978.
- Gurtner, W., S. Fankhauser, W. Ehrnsperger, W. Wende, H. Friedhoff, H. Habrich and S. Botton (1992): EUREF-89 GPS Campaign - Results of the Processing by the "Bern Group". In Gubler E., K. Poder and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.1 (Heft 52), p.146-169, München 1992.
- Hilfiker, J. (1902): Untersuchung der Höhenverhältnisse der Schweiz im Anschluss an den Meereshorizont. L+T, Bern.
- Höggerl, N. (1986): Die Ausgleichung des österreichischen Präzisionsnivellementsnetzes. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Photogrammetrie*, Heft 4/1986, p.216.
- Lang, H. and M. Sacher (1995): Status and Results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN-95). In Gubler E. and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.4 (Heft 56), p.86-96, München 1995.
- Levallois, J.-J. et J. Maillard (1970): Reprise du nivellement primordial et orientation à donner aux travaux futurs. *Bulletin d'information de l'Institut Géographique National*, No.10, 1970.
- L+T (1990): Transformation von Landeskoordinaten CH-1903 in WGS84 Koordinaten, *Technischer Bericht*, L+T, Wabern.
- Marti, U. (1997): Geoid der Schweiz 1997. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, 56. Band, Zürich 1997.
- Matthias, H. (1977): Landestriangulation der Schweiz: Rückblick, Umschau, und Vorschläge für die zukünftige Entwicklung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 7/1977, p.221-229.
- Matthias, H., P. Kasper und D. Schneider (1980): Amtliche Vermessungswerke: Bd.1, Geschichte und Grundlagen, Sauerländer, Aarau.
- Minster, J. B. and T. H. Jordan (1978): Present-day Plate Motions. *J. Geophys. Res.*, 83, pp.5331-5354.
- Molodensky, M. S., V. F. Yeremeyev and M. I. Yourkina (1962): Methods for study of the external gravitational field and figure of the earth. Transl. from Russian (1960). Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations.
- Moritz, H. (1984): Geodetic Reference System 1980. *Bulletin géodésique*, vol. 58, No 3, p.388-398, 1984.
- Niethammer, Th. (1932): Nivellement und Schwere als Mittel zur Berechnung wahrer Meereshöhen. *Veröffentlichung der Schweizerischen Geodätischen Kommission*, L+T, Wabern.
- Oettli, H. (1986): Von der alten Sternwarte Bern zum Gedenkstein des Koordinatenursprunges. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 10/1986, p.531-536.
- Rosenmund, M. (1903): Die Änderung des Projektionssystems der schweizerischen Landesvermessung, L+T, Bern.
- Rothacher, M., W. Gurtner, G. Beutler, T. Schildknecht, I. Bauersima, E. Gubler, A. Wiget, A. Geiger, M. Cocard, H.-G. Kahle, B. Wirth (1993): NFP20: Beitrag der Geodäsie zur geologischen Tiefenstruktur und Alpendynamik. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, 47. Band, S.15.
- Santschi, W. und U. Wild (2001): Fundamentalstation Zimmerwald: Lokale Beziehungen. Messungen vom 7./8. Sept. 1998; *Technischer Bericht 99-18* (in prep.).

- Sacher, M., J. Ihde and H. Lang (1998): Results and Adjustment of the United European Levelling Network 1995 (UELN-95/98). Report by the UELN data centre.
- Schlatter, A. und U. Marti (1998): Neues Landeshöhennetz der Schweiz LHN95: Provisorische kinematische Ausgleichung 1998 zur Festlegung der orthometrischen Höhe des Fundamentalpunktes Zimmerwald. *Technischer Bericht* 98-26, L+T, Wabern.
- Schmid, H. H. und S. Heggli (1978): Räumliche Koordinatentransformation. *IGP-Mitteilung* Nr.23, 1978.
- Schneider, D. (1982): Complex crustal strain approximation. Mitteilungen 33, *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ*, Zürich.
- Schneider, D. (1993): Neues Konzept der Schweizerischen Landesvermessung: Erste Erfahrungen bei der Realisierung eines GPS-gestützten Landesnetzes. *Beitrag zum 31. DVW-Seminar: GPS - eine universelle geodätische Methode*. Technische Universität Dresden, 22. - 24. März 1993.
- Schneider, D., E. Gubler und A. Wiget (1995): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': Teil 1: Vorgeschichte, Entstehung des Projekts, Konzept und Planung. *Berichte aus der L+T*, Nr.6, Wabern.
- Schneider, D., T. Signer, B. Vogel und A. Wiget (1996): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': Teil 8: Gesamtausgleichung des GPS-Landesnetzes mit dem Diagnosenetz der Triangulation 1. bis 2. Ordnung 'DIA95'. *Berichte aus der L+T*, Nr.13, Wabern, (in prep.).
- Signer, T. und B. Vogel (1999): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': Teil 9: GPS-Landesnetz: Verdichtung und Bezug zur bisherigen Landesvermessung. Transformation 'LV95 $\leftrightarrow$ LV03'. *Berichte aus der L+T*, Nr.15, Wabern, 1999.
- Snyder, J. P. (1983): Map projections used by the U.S. Geological Survey. *Geological Survey Bulletin* 1532, 2nd Ed., U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Schürer, M. (1944): Die Reduktion und Ausgleichung des Schweizerischen Landesnivellements. *Annexe aux procès-verbal de la 88^{ème} séance de la Commission Géodésique Suisse*, Basel.
- Schürer, M. (1990): Das schweizerische geodätische Datum. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, 2/1990, p.88-89.
- Vaníček, P. and E. Krakiwsky (1982): *Geodesy: The Concepts*. North-Holland, 1982.
- Vogel, B., D. Gutknecht, W. Santschi, Th. Signer, und A. Wiget (1996): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': Teil 6: GPS-Landesnetz: GPS-Messungen 1988-94. *Berichte aus der L+T*, Nr.12, Wabern, 1997.
- Vogel, B., D. Gutknecht, W. Santschi, Th. Signer und A. Wiget (1998): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': Teil 6: GPS-Landesnetz: GPS-Messungen 1988 - 94. *Berichte aus der L+T*, Nr.12, Wabern
- Wiget, A., E. Gubler und D. Schneider (1991): GPS-Präzisionsnetz zur Bestimmung von rezenten Krustenbewegungen in der Nordschweiz. *VPK* 8/91, pp.415-426.
- Wiget, A. (1996): Swiss GPS Campaigns for the densification of EUREF and the establishment of the new national network 'LV95'. In Gubler E. and H. Hornik (Eds.): *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung*. Publication Nr.5 (Heft 57), p.73-84, München 1996 und ebenfalls abgelegt als *Technischer Bericht* 96-12.
- Wiget, A., E. Gubler und D. Schneider (1996): GPS-Netz Neotektonik Nordschweiz: Messkampagne 1995 und Deformations-Grobanalyse 1988-95. *Technischer Bericht* 96-05, L+T, Wabern.
- Wiget, A. (2001): LV95-CHTRF98: GPS-Messungen 1998: Messkampagne vom 10.08.-25.09. 1998. *Technischer Bericht* 98-15 (in prep.).
- Wiget, A., U. Wild, T. Signer und B. Vogel (2001): Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95': Teil 7: GPS-Landesnetz: Auswertung der GPS-Messungen 1988-94; Bezugsrahmen 'CHTRF95' und 'LV95'. *Berichte aus der L+T*, Nr.12, Wabern, (in prep.).
- Wild, U., E. Brockmann, S. Grünig, R. Hug, Ch. Just, P. Kummer, Th. Signer und F. Wicki (2001): Automatisches GPS-Netz Schweiz (AGNES). *Technischer Bericht* 00-43 (in prep.).

- Wirth, B. (1990): Höhengsysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrische und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, 42. Band, Zürich 1990.
- Wolf, R. (1879): Geschichte der Vermessungen in der Schweiz, Zürich.
- Zölly, H. (1948): Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz, L+T, Wabern.

Anhang A1: Abkürzungen

AM0-2	kinematisches Modell der Plattentektonik	GPU	Geopotential Units (1 GPU = $10 \text{ m}^2 \text{ sec}^{-2} = 10^6 \text{ mgal m}$)
AV	Amtliche Vermessung	GRS80	Geodetic Reference System 1980
CH1903	schweiz. geodätisches Datum, definiert 1903	IGS	International GPS Service for Geodynamics
CHKM95	kinematisches Modell 1995	IAG	International Association for Geodesy
CHGEO98	Schweizerisches Geoidmodell 1998	IAU	International Astronomical Union
CHTRF95	globaler Bezugsrahmen der Landesvermessung 1995	IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich
CHTRS95	globales Bezugssystem der Landesvermessung 1995	ITRFyy	IERS Terrestrial Reference Frame des Jahres 19yy
CHVRF95	globales Höhenbezugsrahmen der Landesvermessung 1995	ITRS	IERS Terrestrial Reference System
CIO	Conventional International Origin (Pol)	ICRS	International Celestial Reference System
CTS	Conventional Terrestrial System	IERS	International Earth Rotation Service
DIAYy	Diagnoseausgleichung der Triangulation 1. und 2. Ordnung (Version des Jahres 19yy)	KINETZ	Software für die kinematische Ausgleichung von Nivellementsnetzen (L+T)
DORIS	Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite	LAG	Software für die Geoidberechnung (Version IGP)
ETRFyy	European Terrestrial Reference Frame des Jahres 19yy	LHN95	Landeshöhennetz 1995
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989	LN02	Landesnivellement §902
EUREF-89	Europäisches GPS-Referenznetz 1989	LVyy	Bezugsrahmen der Landesvermessung 19yy
EUREF-CH92	schweiz. GPS-Messkampagne im EUREF-Teilnetz 1992	NNR-NUVEL1	Version von NUVEL1 ohne Netzrotation
EUREF-D/NL93	GPS-Messkampagne im EUREF-Teilnetz D/NL1993	NUVEL1	kinematisches Modell der Plattentektonik
EUVN	European Vertical Network	ppm	parts per million
ETH	Eidg. Technische Hochschule	RPN	Repère Pierre du Niton: Referenzpunkt des Bezugssystems CH1903
FK5	Fundamentalkatalog 5. Sternkatalog des astronomischen Recheninstituts Heidelberg.	SLR	Satellite Laser Ranging
GEOREF	Software für die geodätische Koordinatentransformation (L+T)	UELN	Unified European Levelling Network
GEOLOT	Software für die Geoidberechnung (Version L+T)	UTM	Universal Transverse Mercator (Kartenprojektion)
GPS	Global Positioning System	SGK	Schweiz. Geodätische Kommission
		VLBI	Very Long Baseline Interferometry
		WGS84	World Geodetic System 1984 (GPS-Bezugssystem)

Anhang A2: Verwendete Bezeichnungen für Grössen des Bezugssystems und des Schwerefeldes

Geometrische Grössen

Ellipsoid:

grosse Halbachse:	a
kleine Halbachse	b
Abplattung	f
erste numerische Exzentrizität	e
zweite numerische Exzentrizität	e'
lineare Exzentrizität	ε

geometrische Koordinaten und deren Änderungen:

(lokal) geozentrisch kartesische Koordinaten	X, Y, Z
geozentrisch kartesische Koordinaten unter Angabe des Bezugsrahmens (-systems) und der Epoche:	$X_{\text{ETRF93}}(\text{Ep.1997.5})$
Geschwindigkeiten	$V_{X(\text{ETRF93})}$
ellipsoidische Länge	λ
ellipsoidische Breite	φ
ellipsoidische Höhe	h (oder h_{ell})
geozentrische Breite	β
reduzierte Breite	β'

Hilfsgrössen für das schweizerische Projektionssystem:

Länge auf der Kugel	l
Breite auf der Kugel	b
Länge im Pseudoäquatorsystem	$\bar{l}$
Breite im Pseudoäquatorsystem	$\bar{b}$
Radius der Kugel	R
Meridiankrümmungsradius	R_M
Querkrümmungsradius	R_N
Meridiankonvergenz	μ

Projektionskoordinaten:

LV03 / LN02	y, x, H (oder H_{LN02})
LV95 / LHN95	E, N, H (oder H_{LHN95})

Transformationsparameter

Translationen	dX, dY, dZ
Rotationen	r_X, r_Y, r_Z
Massstab	s
Massstabsunterschied	$m (= s - 1)$

Astronomische Grössen

Astronomische Länge	Λ
Astronomische Breite	Φ
Lotabweichung (Total)	ε
Lotabweichung (Nord-Süd-Komponente)	ξ
Lotabweichung (Ost-West-Komponente)	η
Lotabweichung auf Höhe des Geoids	$\varepsilon_0, \xi_0, \eta_0$
Lotkrümmung	$\Delta\varepsilon, \Delta\xi, \Delta\eta$

Geoid, Quasigeoid

Geoidundulation	N
Höhenanomalie	ζ

Höhen

ellipsoidische Höhe	h (oder h_{ell})
orthometrische Höhe	H (oder H_{orth})
Normalhöhe	H_{norm}
Dynamische Höhe	H_{dyn}
Gebrauchshöhe	H (oder H_{LN02})

Potentiale

geopotentielle Kote	C
Schwerepotential (auf Meereshöhe)	W (W_0)
Normalpotential (auf Meereshöhe)	U (U_0)
Störpotential	T

Schwere

Absolutschwere	g
Normalschwere	γ (ev. g_{norm})
mittlere Schwere in der Lotlinie	$\bar{g}$
mittlere Normalschwere in der Lotlinie	$\bar{\gamma}$
Schwereanomalie	Δg
Freiluftanomalie	Δg_F
Bougoueranomalie	Δg_B
Schwerestörung (gravity disturbance)	δg

Anhang A3: Zusammenfassung der Systemdefinitionen von LV95

Bezugssystem: CH1903+

Bezugsrahmen: LV95 / LHN95

Bezugsellipsoid:

Ellipsoid: Bessel 1841

($a = 6\,377\,397.155\text{ m}$; $1/f = 299.15281285$)

Fundamentalkpunkt Z_0 : Geostation Zimmerwald (Mastbolzen):

λ_0	=	7° 27' 58.417 7"	X_0	=	4 330 616.710 m
φ_0	=	46° 52' 42.270 3"	Y_0	=	567 539.793 m
h_0	=	897.361 m	Z_0	=	4 632 721.686 m

Lotabweichungen:

$\xi_0 = 3.73''$

$\eta_0 = 1.68''$

(Geoidberechnung 1998)

Projektionssystem: Schiefachsige, winkeltreue Zylinderprojektion

Koordinatenursprung: P_0 alte Sternwarte Bern

λ_0	=	7° 26' 22.50"
φ_0	=	46° 57' 08.66"
E_0	=	2 600 000 m ('false easting')
N_0	=	1 200 000 m ('false northing')

Höhensystem: Strenges orthometrisches Höhensystem

Ausgangspunkt: Z_0 Geostation Zimmerwald:

$H_0 = 897.906\,3\text{ m}$

(Anschluss: Repère Pierre du Niton; Pegel Marseille)

Höhenbezug zum Geoid Z_0 : Geostation Zimmerwald:

$N_0 = -0.545\,3\text{ m}$

(Geoidberechnung 1998)

Kinematisches Modell:

Kein kinematisches Modell (Koord. und Höhen sind statisch und nur für $t_0 = 1993.0$ definiert)

Bezugssystem: CHTRS95

Bezugsrahmen: CHTRF95 / CHVN95

Bezugsellipsoid:

Ellipsoid: GRS80

($a = 6\,378\,137.00\text{ m}$; $1/f = 298.257\,222\,101$)

Fundamentalpunkt Z_0 : *Geostation Zimmerwald (Mastbolzen):*

λ_0	=	7° 27' 54.984 9"	X_0	=	4 331 291.084 m
φ_0	=	46° 52' 37.541 6"	Y_0	=	567 554.849 m
h_0	=	947.149 m	Z_0	=	4 633 127.032 m

Lotabweichungen:

ξ_0	=	8.46 "
η_0	=	4.02 "

Projektionssystem: Universal Transverse Mercator (UTM)

Meridianstreifen	Nr:	32
Zentralmeridian:	L_0	= 9°
Massstabsfaktor:	M	= 0.9996
False easting:	E_0	= 500 000 m

Höhensystem: CHVN95 Strenges Höhensystem (Geopotentialwerte): Sowohl Normalhöhen wie auch orthometrische Höhen berechenbar.

Ausgangspunkt: Z_0 *Geostation Zimmerwald:*

$C_0 = 880.3459\text{ GPU}$; $H^0_0 = 897.802\,7\text{ m}$; $H^n_0 = 897.715\,4\text{ m}$
(Anschluss: UELN; Pegel Amsterdam)

Höhenbezug zum Geoid Z_0 : *Geostation Zimmerwald:*

$N_0 = 49.346\,3\text{ m}$
(Geoidberechnung 1998)

Kinematisches Modell:

CHKM95 (zurzeit prov. Festlegung der Geschwindigkeit in Zimmerwald: $\dot{X} = \dot{Y} = \dot{Z} = 0$)

Anhang A4: Festlegung des Fundamentalpunktes Zimmerwald in den Systemen *CHTRS95* und *CH1903+*

A4.1 Dreidimensionale Position im *CHTRS95*

Ausgangsgrößen sind die im IERS Technical Note 18 (Oktober 1994) veröffentlichten *ITRF93-Koordinaten* und Geschwindigkeiten des Laserpunktes 7810 (Achsenschnittpunkt des alten Lasers, DOMES-Nummer 14001S001) der Epoche 1993.0.

<i>ITRF93:</i>	X = 4331283.561 m	$\dot{X} = -0.0211$ m/Jahr
(Ep. = 1993.0)	Y = 567549.661 m	$\dot{Y} = 0.0234$ "
	Z = 4633140.041 m	$\dot{Z} = 0.0177$ "

In einem ersten Schritt werden diese Größen mit den Individualgeschwindigkeiten in die Epoche 1989.0 transformiert. Durch eine anschliessende 3-Parameter-Transformation ($dX = 0.019$ m, $dY = 0.053$ m, $dZ = -0.021$ m; [Boucher and Altamimi, 1995]) erhalten wir die *ETRF93*-Koordinaten im *ETRS89*.

<i>ETRF93:</i>	X = 4331283.6644 m	$\dot{X} = -0.0017$ m/Jahr
(Ep. = 1989.0)	Y = 567549.6204 m	$\dot{Y} = 0.0021$ "
	Z = 4633139.9492 m	$\dot{Z} = 0.0022$ "

Die Individualgeschwindigkeiten im *ETRF93* ergeben sich aus der Differenz zwischen den Individualgeschwindigkeiten im *ITRF93* und dem Geschwindigkeitsmodell des *ITRF93*¹.

Im zweiten Schritt werden die Koordinaten des *ETRF93* mit Hilfe eines kinematischen Modells (CHKM95) ins System *CHTRS95* zur Epoche 1993.0 transformiert. Dabei wurde die Individualgeschwindigkeit des Fundamentalpunktes im *ETRF93* verwendet. Die Aufteilung dieser Geschwindigkeit in einen regionalen und einen lokalen Anteil wird zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgelegt. Deshalb können jetzt noch keine Individualgeschwindigkeiten im *CHTRF95* angegeben werden. Die resultierenden Koordinaten für den Laserpunkt 7810 im *CHTRF95* (= *ETRF93* zur Epoche 1993.0):

<i>CHTRF95:</i>	X = 4331283.6578 m	$\dot{X} = ? (\sim 0)$ m/Jahr
(Ep. = 1993.0)	Y = 567549.6287 m	$\dot{Y} = ? (\sim 0)$ "
(Laserpunkt)	Z = 4633139.9577 m	$\dot{Z} = ? (\sim 0)$ "

Da nicht der Laserpunkt 7810 sondern der Fusspunkt des GPS-Mastes (MB) als neuer Fundamentalpunkt dienen soll, muss noch die terrestrisch bestimmte Exzentrizität (verwendet wurden hier die Messungen aus dem Jahr 1995) zwischen den beiden Punkten angebracht werden:

<i>CHTRF95</i>	$dX = +7.4258$ m	X = 4331291.084 m
(Ep. = 1993.0)	$dY = +5.2200$ m	Y = 567554.849 m
(MB)	$dZ = -12.9259$ m	Z = 4633127.032 m

Die Resultate wurden dabei auf mm gerundet.

Für die Festlegung weiterer Fundamentalgrößen (Lotabweichung, Geoidundulation) müssen diese Werte noch in geodätische Koordinaten transformiert werden:

(verwendetes Ellipsoid GRS80: $a = 6378137.00$ m, $1/f = 298.257222101$)

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= 7^\circ 27' 54''.9849 \\ \varphi_0 &= 46^\circ 52' 37''.5416 \\ h_0 &= 947.149 \text{ m (ellipsoidische Höhe)}\end{aligned}$$

Die *ITRF93*-Koordinaten für den GPS Punkt Zimmerwald (Domes-Nummer 14001M004), die schlussendlich in der LV95 Gesamtausgleichung fixiert wurden, leiten sich aus den lokalen Einmessungen von 1995 her [Santschi und Wild, 2001].

¹ Dieses rechnet sich aus den NNR-NUVEL1-Rotationen für die eurasische Platte multipliziert mit einem Skalenfaktor von 0.9562 (= NNR-NUVEL1A) plus der Rotationsrate ($R_X = 0.00012$ "/Jahr, $R_Y = 0.00029$ "/Jahr, $R_Z = -0.00002$ "/Jahr) zwischen dem beobachteten Geschwindigkeitsfeld und NNR-NUVEL1A). Mehr dazu siehe IERS Technical Note 18, Seite 17.

Da bei der ITRF93 Ausgleichung fehlerhafte lokale Einmessungselemente verwendet wurden, sind die ebenfalls in der IERS Technical Note 18 aufgeführten GPS Koordinaten um den Fehler der Exzenterelemente korrigiert worden.

Exzenterelemente:		Einmessung 1995	Technical Note 18
	DX(GPS-Laser):	13.6801 m	13.680 m
	DY(GPS-Laser):	6.0115 m	6.012 m
	DZ(GPS-Laser):	-6.2396 m	-6.242 m

Damit wurden als *ITRF93* Koordinaten für den GPS Punkt Zimmerwald verwendet:

		Korrigierte Koordinaten	(Technical Note 18)
<i>ITRF93</i> :	X:	4331297.2411m	(4331297.241 m)
GPS Punkt	Y:	567555.6725 m	(567555.673 m)
(Ep. = 1993.0)	Z:	4633133.8014 m	(4633133.799 m)

A4.2 Lagekoordinaten im System CH1903+

Das Problem bei der Bestimmung des neuen Fundamentalpunktes in diesem System besteht darin, dass der bisherige Fundamentalpunkt (alte Sternwarte Bern) nicht mehr für Messungen zugänglich ist. Deshalb müssen die Koordinaten von Zimmerwald aus den heute zugänglichen Triangulationspunkten Gurten E und Bantiger PF (zur Kontrolle) abgeleitet werden. Diese beiden Punkte liegen in der Nähe des Fundamentalpunktes. Dabei wird angenommen, dass bei der Berechnung der offiziellen Koordinaten im LV03 (System CH1903) keine allzu grossen Verzerrungen aufgetreten seien.

Die offiziellen Landeskoordinaten der an der Berechnung beteiligten Punkte im LV03 (System CH1903):

	y [m]	x [m]	H [m]	
TP Zimmerwald CH99	602062.24	191792.87	897.84	(zur Kontrolle)
TP Gurten E	600392.94	196243.43	858.08	
TP Bantiger PF	606779.58	202982.65	947.34	(zur Kontrolle)

Andererseits sind alle diese Punkte auch im Rahmen der Diagnoseausgleichung (nur Lage) berechnet worden. Ihre Koordinaten (Lösung DIA94 vom 13. 7. 1994) und die Differenzen zu den offiziellen Koordinaten ergaben sich dabei zu:

	y [m]	x [m]	H [m]	dy [cm]	dx [cm]
TP Zimmerwald CH99	602062.218	191792.784	(897.84)	- 2.2	-8.6
TP Gurten E	600392.853	196243.345	(858.09)	- 8.7	-8.5
TP Bantiger PF	606779.558	202982.656	(947.34)	- 2.2	+0.6

Daraus ergeben sich die folgenden Vektoren (Lösung DIA94, System CH1903):

	Δy [m]	Δx [m]	(ΔH) [m]
TP Gurten E - Zimmerwald CH99	1669.365	- 4450.561	(39.750)
TP Bantiger PF - Zimmerwald CH99	- 4717.340	- 11189.872	(- 49.500) (zur Kontrolle)

Diese Vektoren sind weniger verzerrt als die aus den offiziellen Koordinaten (LV03) gerechneten. Sie werden nun an den offiziellen Koordinaten der TP angebracht. Somit erhalten wir 3 verschiedene Lösungen für den Punkt Zimmerwald CH99, welche im dm-Bereich übereinstimmen:

	y [m]	x [m]	H [m]	
aus offiziellen Koordinaten:	602062.240	191792.870	897.84	(zur Kontrolle)
aus TP Gurten E:	602062.305	191792.869	(897.83)	
aus TP Bantiger PF:	602062.240	191792.778	(897.84)	(zur Kontrolle)

Der vom näher gelegenen TP Gurten E abgeleitete Wert kann als Realisierung von Zimmerwald CH99 im System CH1903+ betrachtet werden:

	E [m]	N [m]	H [m]
Zimmerwald CH99 im System 1903+:	2602062.305	1191792.869	(897.84)

Mit Hilfe der terrestrisch bestimmten Exzentrizitäten (Messung 1995) erhalten wir eine Lösung für den neuen Fundamentalpunkt (Bolzen des GPS-Mastes MB):

dE = - 31.5350 m	E = 2602030.770 m
dN = - 17.8071 m	N = 1191775.062 m
dH = + 0.0709 m	H = 897.911 m (Gebrauchshöhe)

Die Transformation in geodätische Koordinaten (CH1903+) unter Verwendung des Bessel-Ellipsoids ($a = 6377397.155$, $1/f = 299.1528128$) ergibt:

$\lambda_0 =$	7° 27' 58".4177
$\varphi_0 =$	46° 52' 42".2703
$H_0 =$	897.911 m (Gebrauchshöhe)

A4.3 Astronomische Koordinaten und Lotabweichungen

Da wir die Systeme CH1903+ und CHTRS über die geozentrischen Koordinaten des Fundamentalpunktes und über die strenge Achsparallelität festgelegt haben, sind die Lotabweichungen zur Definition des geodätischen Datums nicht nötig. Der Vollständigkeit halber seien sie aber hier trotzdem aufgeführt.

Bei der Angabe von Lotabweichungen des Fundamentalpunktes ist es sinnvoll, dass die astronomischen Koordinaten in allen Bezugssystemen den gleichen Wert erhalten (gleiches astronomisches Bezugssystem ICRS (siehe IERS Technical Note Nr. 7), welches mit dem System des Sternkatalogs FK5 im Rahmen dessen Genauigkeit konsistent ist).

Zur Bestimmung der astronomischen Koordinaten des Fundamentalpunktes, welche eigentlich als Messungen zu betrachten sind, stehen uns verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

a) mit aus GEOLOT (Geoid von Gurtner 1978) gerechneten Lotabweichungen

$$\begin{aligned}\eta &= 2.22'' \\ \xi &= 3.21''\end{aligned}$$

Die Berechnungen wurden inklusive 50m Nahtopographie durchgeführt. Aus diesen Lotabweichungen und den geodätischen Koordinaten im System CH1903+ ergeben sich die astronomischen Koordinaten des Fundamentalpunktes:

$$\begin{aligned}\Lambda_0 &= 7^\circ 28' 1.67'' \\ \Phi_0 &= 46^\circ 52' 45.48''\end{aligned}$$

b) aus den Zenitkamera-Messungen vom 17.9.1987 (CH99) und vom 9.10.1995 (MB)

Messung 1987 (CH99)	Messung 1995 (Mastbolzen)
$\Lambda = 7^\circ 28' 1.63''$	$\Lambda_{0/95} = 7^\circ 28' 1.65''$
$\Phi = 46^\circ 52' 45.79''$	$\Phi_{0/95} = 46^\circ 52' 47.06''$

Das Anbringen der Exzentrizitäten zum Bolzen des GPS-Mastes MB (näherungsweise ellipsoidisch) ($d\Lambda = -1.49''$, $d\Phi = -0.58''$) führt zu den zentrierten Werten der Messung 1987:

$$\begin{aligned}\Lambda_{0/87} &= 7^\circ 28' 0.14'' \\ \Phi_{0/87} &= 46^\circ 52' 45.21''\end{aligned}$$

Die Mittelbildung der beiden Messungen 1987 und 1995 ergibt demnach:

$$\begin{aligned}\Lambda_0 &= 7^\circ 28' 0.89'' \\ \Phi_0 &= 46^\circ 52' 46.13''\end{aligned}$$

c) aus Lotabweichungsprädiktion der Geoidberechnung 1998 (Marti 1998), bei welcher die Messungen von Zimmerwald und anderen umliegenden Stationen berücksichtigt sind

$$\begin{aligned}\eta &= 1.68'' \\ \xi &= 3.73''\end{aligned}$$

Und daraus die astronomischen Koordinaten:

$$\begin{aligned}\Lambda_0 &= 7^\circ 28' 0.87'' \\ \Phi_0 &= 46^\circ 52' 46.00''\end{aligned}$$

Aus den astronomischen und den geodätischen Koordinaten ergeben sich die Lotabweichungen des Fundamentalpunktes in den Systemen CHTRS95 und CH1903+:

	a) aus GEOLOT	b) gemessen	c) aus Geoid98
CH1903+ (Bessel 1841)	$\xi = 3.21''$ $\eta = 2.22''$	$\xi = 3.86''$ $\eta = 1.69''$	$\xi = 3.73''$ $\eta = 1.68''$
CHTRS95 (GRS80)	$\xi = 7.94''$ $\eta = 4.57''$	$\xi = 8.59''$ $\eta = 4.04''$	$\xi = 8.46''$ $\eta = 4.02''$

Vorzuziehen ist dabei die Variante c), weil in ihr alle Messungen berücksichtigt sind.

A4.4 Geodätische Höhen, Geoid

Als Ausgangspunkt der Höhenbestimmung wird im **CH1903+** (*Rahmen: LHN95*) der Repère Pierre du Niton beibehalten. Dabei wird seine offizielle Höhe von 373.600 m (RPN neuer Horizont, 1902, aus dem Anschluss an den Pegel Marseille) als orthometrisch betrachtet. Aus der mittleren Schwere in der Lotlinie von $\bar{g} = 980587.38$ mgal lässt sich sein Potential berechnen:

$$\text{Potential RPN (CH1903+)} \quad C = 366.3475 \text{ GPU}$$

Falls ein kinematisches Modell eingeführt wird, muss dieser Höhe eine Epoche zugeordnet werden. Es wurde gewählt: Epoche für obige Werte (Potential und orthometrische Höhe): 1993.0

Dem **CHTRS95** (*Rahmen CHVN95*) sollen die Resultate des UELN (Referenz: neuer Pegel Amsterdam) zugrunde gelegt werden. Dabei wird der Knotenpunkt Olten C (Lösung UELN 73 [Ehrnsperger and Kok, 1986]) als Fixpunkt betrachtet (Epoche 1993.0):

$$\text{Olten C (SO 85)} \quad C = 393.24655 \text{ GPU}$$

aus den Berechnungen mit KINETZ ergibt sich das Potential des RPN im **CHVN95** (Ep. 1993.0):

$$\text{Potential RPN (CHVN95)} \quad C = 366.2459 \text{ GPU} \quad (\text{Ep. 1993.0})$$

und daraus die orthometrische Höhe (Division durch $\bar{g}$):

$$\text{orthom. Höhe RPN (CHVN95)} \quad H = 373.497 \text{ m}$$

Die Differenz zwischen **CH1903+** und **CHTRS95** beträgt demnach 0.103 m. Sie hat ihre Ursachen im Pegelunterschied zwischen Marseille und Amsterdam, aber auch in Messfehlern und nicht berücksichtigten Hebungen.

Anschluss des Punktes Zimmerwald ans Landesnivellement:

Im März 1995 wurde die Station Zimmerwald an das Landesnivellement angeschlossen. Dies erlaubt die Berechnung von orthometrischen Höhen auf dem neuen Fundamentalpunkt.

In einer provisorischen Teilauswertung des Landeshöhennetzes LHN95 [Schlatter und Marti, 1998] ergab sich für das Potential des Mastbolzens (MB = BES 498) in Zimmerwald (CH1903+) folgender Wert:

$$\text{Potential Zimmerwald MB (CH1903+)} \quad C = 880.4475 \text{ GPU} \quad (\text{Ep. 1993.0})$$

Im **CHTRS95** ergibt sich das Potential durch Abzug des Offsets von 0.1016 GPU

$$\text{Potential Zimmerwald MB (CHTRS95)} \quad C = 880.3459 \text{ GPU} \quad (\text{Ep. 1993.0})$$

Die beobachtete Schwere im Punkt Zimmerwald beträgt 980512.010 mgal (Messung 1995) und die mittlere Schwere in der Lotlinie wurde zu $\bar{g} = 980556.07$ mgal berechnet. Daraus ergibt sich die orthometrische Höhe von Zimmerwald MB in den beiden Systemen:

$$\begin{aligned} H_0 (\text{CH1903+}) &= 897.9063 \text{ m} & (\text{Ep. 1993.0}) \\ H_0 (\text{CHTRS95}) &= 897.8027 \text{ m} & (\text{Ep. 1993.0}) \end{aligned}$$

Die Normalhöhe des Fundamentalpunktes in beiden Systemen erhält man durch Division des Potentials durch die mittlere Normalschwere in der Lotlinie $\bar{\gamma} = 980651.51$ mgal:

$$\begin{aligned} H_{\text{norm}} (\text{CH1903+}) &= 897.8190 \text{ m} & (\text{Ep. 1993.0}) \\ H_{\text{norm}} (\text{CHTRS95}) &= 897.7154 \text{ m} & (\text{Ep. 1993.0}) \end{aligned}$$

Die Vertikalgeschwindigkeit für den Fundamentalpunkt kann noch nicht berechnet werden, da erst eine Nivellementsepoche beobachtet wurde.

Die Geoidhöhe im **CHTRS95** ergibt sich aus der orthometrischen Höhe und der ellipsoidischen Höhe zu:

$$N = h - H_0 = 49.3463 \text{ m} \quad (\text{CHTRS95})$$

Im CH1903+ kann die Geoidundulation noch frei gewählt werden. Hier kommt die bisherige Definition von $N(\text{Schwerzenbach}) = 0$ zum Einsatz. Aus der kombinierten Geoidberechnung (Marti 1998) ergibt sich für den Fundamentalpunkt eine Geoidundulation von

$$N = -0.5453 \text{ m} \quad (\text{CH1903+})$$

Daraus resultiert auch noch die ellipsoidische Höhe h in Zimmerwald im CH1903+:

$$h = N + H = 897.3610 \text{ m} \quad (\text{CH1903+})$$

Bemerkung: Tatsächlich musste die ellipsoidische Höhe des Fundamentalpunktes $h = 897.361 \text{ m}$ bereits 1995 mit provisorischen Werten für die orthometrische Höhe ($H_{\text{prov}} = 897.840 \text{ m}$) und die Geoidundulation ($N_{\text{prov}} = -0.479 \text{ m}$) fixiert werden. Diese ellipsoidische Höhe kann nicht mehr verändert werden, da die daraus bestimmten Transformationsparameter (siehe Anhang A5) zwischen CHTRS95 und CH1903+ bereits in vielen Berechnungen verwendet wurden. Die Konsequenz daraus ist, dass sich bei der definitiven Lagerung von CH1903+ in Schwerzenbach nicht mehr exakt der Wert 0 ergibt. Die Abweichung von ca. 11 cm ist jedoch unbedeutend in Anbetracht der Differenzen von -35 cm bis +15 cm, die zwischen den Geoiden von Gurtner und Marti ohnehin bestehen.

Ein heikler Punkt bei der Festlegung der Fundamentalgrössen sind zudem die Resultate der lokalen Einmessungen der verschiedenen Punkte in Zimmerwald. Zur Festlegung wurden nämlich 4 verschiedene Punkte verwendet: Der Laserpunkt 7810, der RETrig-Punkt CH99, der GPS-Punkt (L+T88) sowie der eigentliche Fundamentalpunkt im Fundament des GPS-Mastes. Die bisher durchgeführten lokalen Einmessungen dieser Punkte (1993 bis 1998) zeigen jedoch Abweichungen von bis zu 3 mm. Diese Ungenauigkeit der Bestimmung der relativen Lage dieser Punkte geht zum Teil in die festgelegten Fundamentalgrössen ein.

A4.5 Zusammenstellung der Fundamentalgrössen in Zimmerwald

a) CHTRS95

Fundamentalgrössen: GRS80-Ellipsoid (mit grosser Halbachse a und Abplattung f)
 3D-Position (geozentrisch oder Länge, Breite und ellipsoidische Höhe) zu einem bestimmten Datum und zugehörige Geschwindigkeiten.
 Astronomische Koordinaten (Länge und Breite)
 orthometrische Höhe

abgeleitete Grössen: Geoidundulation
 Lotabweichungen

b) CH1903+

Fundamentalgrössen: Bessel-Ellipsoid (mit grosser Halbachse a und Abplattung f)
 Ellipsoidische Länge und Breite (aus Projektionskoordinaten)
 3D-Geschwindigkeiten
 Astronomische Koordinaten (Länge und Breite) identisch mit CHTRS95
 orthometrische Höhe
 Geoidundulation

abgeleitete Grössen: ellipsoidische Höhe (sowie geozentrisch kartesische Koordinaten)
 Lotabweichungen

Anhang A5: Transformationsparameter zwischen *CH1903+* und *CHTRS95*

Da die beiden Systeme achsparallel sind und den gleichen Massstab aufweisen, wird nur eine Translation der beiden Systeme zugelassen. Deshalb genügt ein einziger Punkt (der Fundamentalpunkt zur Bestimmung der Transformationsparameter).

Die geozentrischen Koordinaten im *CH1903+* ergeben sich aus den in Anhang A4.2 berechneten Lagekoordinaten und der in Anhang A4.4 ausgewiesenen ellipsoidischen Höhe:

$$\begin{aligned}\lambda &= 7^\circ 27' 58''.4177 \\ \varphi &= 46^\circ 52' 42''.2703 \\ h &= 897.361 \text{ m}\end{aligned}$$

Daraus mit GEOREF die geozentrischen Koordinaten

$$\begin{aligned}X_{(CH1903+)} &= 4330616.710 \text{ m} \\ Y_{(CH1903+)} &= 567539.793 \text{ m} \\ Z_{(CH1903+)} &= 4632721.686 \text{ m}\end{aligned}$$

Die geozentrischen Koordinaten im *CHTRS95* sind bereits in Kapitel A4.1 des Anhangs 4 aufgelistet:

$$\begin{aligned}X_{(CHTRS95)} &= 4331291.084 \text{ m} \\ Y_{(CHTRS95)} &= 567554.849 \text{ m} \\ Z_{(CHTRS95)} &= 4633127.032 \text{ m}\end{aligned}$$

Daraus lassen sich nun die Transformationsparameter berechnen:

$$\begin{aligned}X_{(CH1903+)} &= X_{(CHTRS95)} - 674.374 \text{ m} \\ Y_{(CH1903+)} &= Y_{(CHTRS95)} - 15.056 \text{ m} \\ Z_{(CH1903+)} &= Z_{(CHTRS95)} - 405.346 \text{ m}\end{aligned}$$

Anhang A6: Schweizerische Landesprojektion: Schiefachsige winkeltreue Zylinderprojektion

A6.1 Beschreibung und Zweck der Abbildung

Das Projektionssystem der Schweiz. Landesvermessung ist eine schiefachsige, konforme (winkeltreue) Zylinderprojektion. Die geodätischen Breiten φ und Längen λ des Bessel'schen Rotationsellipsoids werden auf die rechtwinkligen ebenen Koordinaten y und x (resp. E und N in LV95) abgebildet. Die Projektion erfolgt in zwei Schritten:

- konforme Abbildung des Ellipsoids auf eine Kugel (nach Gauss)
- konforme Abbildung der Kugel auf einen schiefachsigen Zylinder (nach Mercator).

Der Zweck liegt einerseits in der Darstellung einer krummen Fläche in eine Ebene (Kartografie), andererseits in einfacheren Berechnungen im Vermessungswesen.

Da Winkeltreue und Flächentreue nicht vereinbar sind, ist die Projektion nicht flächentreu.

Konstanten:

Grosse Achse des Rotationsellipsoids:	a	=	6377397.15500 m
1. numerische Exzentrizität im Quadrat:	e^2	=	0.0066743722306
Ellipsoidische Länge von Bern:	λ_0	=	7°26'22.5" = 7.439583333°
Ellipsoidische Breite von Bern:	φ_0	=	46°57'08.66" = 46.952405556°

(Für die Landeskarte wurde nicht die durch die ursprünglichen Berechnungen festgelegte Breite gewählt, sondern entsprechend neueren Messungen (1937) der Wert $\varphi_0 = 46^\circ 57' 07.90''$).

Hilfsgrössen sind:

Der Meridiankrümmungsradius $R_M = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^3}}$ und

der Querkrümmungsradius $R_N = \frac{a}{\sqrt{(1-e^2 \cdot \sin^2 \varphi)}}$

A6.2 Konforme Abbildung des Ellipsoids auf eine Kugel vom Radius R

φ und λ : ellipsoidische Breite und Länge
 b und l : entsprechende Breite und Länge auf der Kugel

Meridiane des Ellipsoids sollen in Meridiane der Kugel übergehen. Wegen der Winkeltreue gehen dann auch Parallelkreise des Ellipsoids in Parallelkreise der Kugel über, und die Längen gezählt vom Nullmeridian auf der Kugel (durch Bern) sind proportional der Längendifferenz $\lambda - \lambda_0$ auf dem Ellipsoid:

$$l = \alpha \cdot (\lambda - \lambda_0)$$

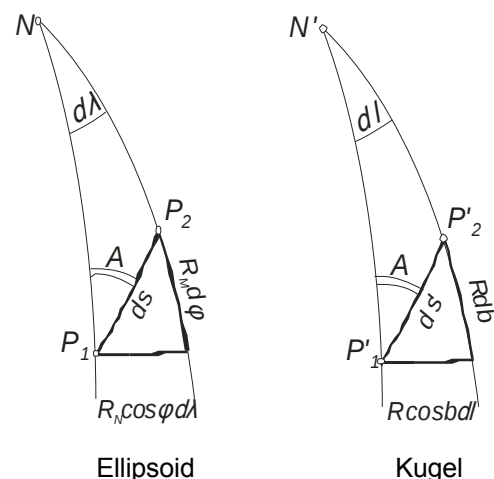
Die Verzerrungsverhältnisse im Meridian und im Parallel sind:

$$m(\varphi) = \frac{R \cdot db}{R_M \cdot d\varphi}$$

$$m(\lambda) = \frac{R \cdot \cos b \cdot dl}{R_N \cdot \cos \varphi \cdot d\lambda} = \alpha \cdot \frac{R \cdot \cos b}{R_N \cdot \cos \varphi}$$

Die Verzerrungsverhältnisse $m(\varphi)$ und $m(\lambda)$ müssen gleich gross sein, d.h.:

$$\frac{db}{\cos b} = \alpha \cdot \frac{R_M \cdot d\varphi}{R_N \cdot \cos \varphi}$$



Durch Integration dieser Differentialgleichung erhält man die Abbildungsgleichungen für die winkeltreue Abbildung des Ellipsoids auf die Kugel:

$$\text{mit } \sin \varphi' = e \cdot \sin \varphi$$

$$\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{b}{2} \right) = \alpha \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \alpha e \cdot \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) + K$$

$$\text{und} \quad l = \alpha (\lambda - \lambda_0)$$

Die Parameter α , R und K sind noch frei verfügbar und können so bestimmt werden, dass die Verzerrung m im Punkte φ_0 , λ_0 gleich 1 und ausserhalb möglichst wenig davon abweicht. Dies erreicht man mit den Bedingungen

$$m(\varphi_0) = 1 ; \quad m'(\varphi_0) = 0 ; \quad m''(\varphi_0) = 0$$

und man erhält nach einigen Umformungen für

$$\alpha^2 = 1 + \frac{e^2}{1-e^2} \cdot \cos^4 \varphi_0 \quad \text{oder} \quad \alpha = 1.00072913843038$$

$$b_0 \text{ aus } \sin b_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \sin \varphi_0 \quad \text{oder} \quad b_0 = 0^\circ.81869435858$$

$$R = \sqrt{R_{M0} \cdot R_{N0}} = 6378815.90365 \text{ m} \quad \text{und}$$

$$K = \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{b_0}{2} \right) - \alpha \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) + \alpha e \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'_0}{2} \right)$$

$$K = 0.0030667323772751$$

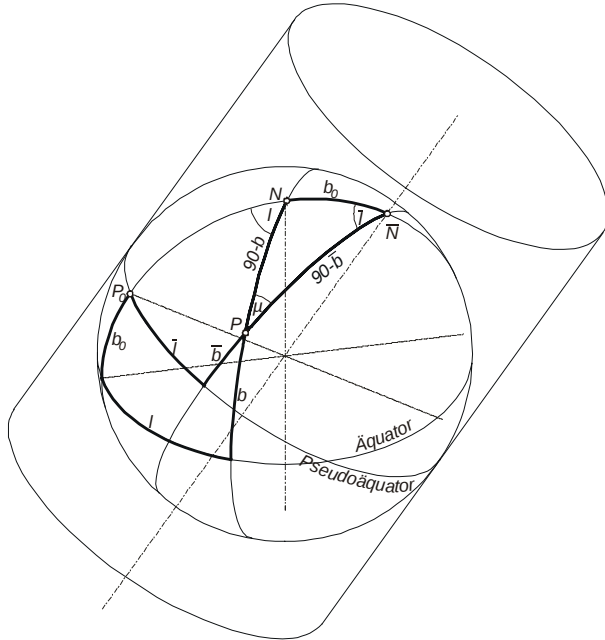
Zusammenfassung der Formeln:

Länge auf der Kugel:	$l = \alpha \cdot (\lambda - \lambda_0)$
Breite auf der Kugel:	$b = 2 \cdot \left(\arctan(e^S) - \frac{\pi}{4} \right)$

wobei: $S = -\alpha \cdot \ln \left(\tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \right) - \frac{\alpha \cdot e}{2} \cdot \ln \left(\frac{1 + e \cdot \sin \varphi}{1 - e \cdot \sin \varphi} \right) + K$

A6.3 Übergang vom Äquatorsystem ins Pseudoäquatorsystem

Da die Kugel auf einen berührenden Zylinder abgebildet wird, dessen Achse nicht mit der Erdachse zusammenfällt, wird auf der Kugel ein neues Koordinatensystem $\bar{b}, \bar{l}$ eingeführt, mit dem neuen Äquator (Berührungskreis Kugel / Zylinder) durch b_0 und $l_0 = 0$. Die Transformationsformeln lauten:



$$\cos \bar{b} \cdot \cos \bar{l} = \sin b_0 \cdot \sin b + \cos b_0 \cdot \cos b \cdot \cos l$$

$$\cos \bar{b} \cdot \sin \bar{l} = \cos b \cdot \sin l$$

$$\sin \bar{b} = \cos b_0 \cdot \sin b - \sin b_0 \cdot \cos b \cdot \cos l$$

oder aufgelöst:

$$\bar{l} = \arctan \left(\frac{\sin l}{\sin b_0 \cdot \tan b + \cos b_0 \cdot \cos l} \right)$$

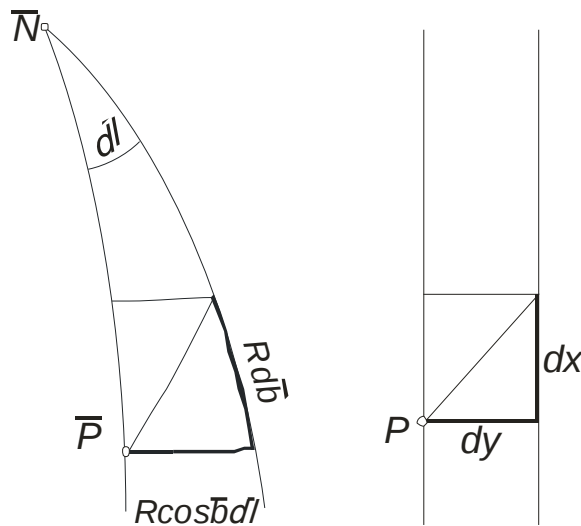
$$\bar{b} = \arcsin(\cos b_0 \cdot \sin b - \sin b_0 \cdot \cos b \cdot \cos l)$$

Die Meridiankonvergenz μ erhält man aus

$$\cos \bar{b} \cdot \sin \mu = \sin b_0 \cdot \sin l$$

$$\cos \bar{b} \cdot \cos \mu = \cos b_0 \cdot \cos b + \sin b_0 \cdot \sin b \cdot \cos l$$

A6.4 Winkeltreue Abbildung der Kugel auf den Zylinder



Die Verzerrungsverhältnisse sind:

$$m(\bar{b}) = \frac{R \cdot d\bar{b}}{dx} \quad \text{und}$$

$$m(\bar{l}) = \frac{R \cdot \cos \bar{b} \cdot d\bar{l}}{dy} \cdot \left(\frac{R \cdot d\bar{l}}{dy} = 1 \right)$$

Aus $m(\bar{b}) = m(\bar{l})$ folgt

$$dx = \frac{R \cdot d\bar{b}}{\cos \bar{b}} \quad \text{und integriert}$$

$$x = R \cdot \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\bar{b}}{2} \right)$$

$$y = R \cdot \bar{l}$$

A6.5 Die Umkehrung der Projektion: $(y,x) \rightarrow (\varphi,\lambda)$

Mit den Konstanten φ_0 , λ_0 , b_0 , α , R und K lassen sich nun auch aus den Projektionskoordinaten y und x die ellipsoidischen Koordinaten φ und λ berechnen.

$$\text{Aus } \bar{x} = \exp\left(\frac{x}{R}\right) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\bar{b}}{2}\right) \quad \text{folgt} \quad \bar{b} = 2\left(\arctan \bar{x} - \frac{\pi}{4}\right), \quad \bar{l} = \frac{y}{R}$$

Die Transformation von $\bar{b}$ und $\bar{l}$ auf b und l lautet:

$$\begin{aligned} \cos b \cdot \cos l &= -\sin b_0 \cdot \sin \bar{b} + \cos b_0 \cdot \cos \bar{b} \cdot \cos \bar{l} \\ \cos b \cdot \sin l &= \cos \bar{b} \cdot \sin \bar{l} \\ \sin b &= \cos b_0 \cdot \sin \bar{b} + \sin b_0 \cdot \cos \bar{b} \cdot \cos \bar{l} \end{aligned}$$

oder aufgelöst:

$$\begin{aligned} b &= \arcsin(\cos b_0 \cdot \sin \bar{b} + \sin b_0 \cdot \cos \bar{b} \cdot \cos \bar{l}) \\ l &= \arctan\left(\frac{\sin \bar{l}}{\cos b_0 \cdot \cos \bar{l} - \sin b_0 \cdot \tan \bar{b}}\right) \end{aligned}$$

Die Abbildungsgleichung

$$\ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{1}{\alpha} \left[\ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{b}{2}\right) - K \right] + e \ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

muss iterativ gelöst werden. Man setze im zweiten Glied in erster Näherung für φ : φ_0 .

λ erhält man aus: $\lambda = \lambda_0 + \frac{l}{\alpha}$

Man beachte, dass φ und λ ellipsoidische Koordinaten sind, die von astronomischen Breiten Φ und Längen Λ wegen der Lotabweichungen um mehrere Bogensekunden abweichen können.

A6.6 Zusammenfassung der Formeln mit Berechnungsbeispiel

Bezeichnungen

- φ, λ : geogr. Breite und Länge im Bezugssystem CH1903/03+ bezüglich Greenwich
 b, l : Kugelkoordinaten bezüglich Nullpunkt Bern
 $\bar{b}, \bar{l}$: Kugelkoordinaten bezüglich Pseudoäquatorsystem in Bern
 Y, X : Zivilkoordinaten
 y, x : Landeskoordinaten (Militärkoordinaten) in LV03 oder LV95

Wo nichts anderes angegeben ist, wird in den Formeln die Winkleinheit Radian [rad] und die Längeneinheit Meter [m] vorausgesetzt.

Konstanten

- $a = 6377397.155 \text{ m}$ grosse Halbachse des Bessel-Ellipsoids
 $e^2 = 0.006674372230614$ 1.numerische Exzentrizität (im Quadrat) des Bessel-Ellipsoids
 $\varphi_0 = 46^\circ 57' 08.66''$ geogr. Breite des Nullpunkts in Bern
 $\lambda_0 = 7^\circ 26' 22.50''$ geogr. Länge des Nullpunkts in Bern

Berechnung von Hilfsgrössen

Radius der Projektionskugel:
$$R = \frac{a \cdot \sqrt{1-e^2}}{1-e^2 \sin^2 \varphi_0} = 6378815.90365 \text{ m}$$

Verhältnis Kugellänge zu Ellipsoidlänge:
$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{e^2}{1-e^2} \cdot \cos^4 \varphi_0} = 1.00072913843038$$

Breite des Nullpunkts auf der Kugel:
$$b_0 = \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_0}{\alpha}\right) = 46^\circ 54' 27.83324844''$$

Konstante der Breitenformel:

$$K = \ln\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{b_0}{2}\right)\right) - \alpha \cdot \ln\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)\right) + \frac{\alpha \cdot e}{2} \cdot \ln\left(\frac{1+e \cdot \sin \varphi_0}{1-e \cdot \sin \varphi_0}\right) = 0.0030667323772751$$

Ellipsoidische Koordinaten (φ, λ) $\Rightarrow$ Schweiz. Projektionskoordinaten (y, x)

Die Zwischenergebnisse beziehen sich auf das Beispiel Rigi mit folgenden Werten:

$$\begin{aligned} \varphi &= 47^\circ 03' 28.95659233'' & &= 0.821317799 \text{ rad} \\ \lambda &= 8^\circ 29' 11.11127154'' & &= 0.148115967 \text{ rad} \end{aligned}$$

Ellipsoid (φ, λ) $\Rightarrow$ Kugel (b, l) (Gauss'sche Projektion)

Hilfsgrösse:
$$S = -\alpha \cdot \ln\left(\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\right) - \frac{\alpha \cdot e}{2} \cdot \ln\left(\frac{1+e \cdot \sin \varphi}{1-e \cdot \sin \varphi}\right) + K = 0.931969601072417$$

Kugelbreite:
$$b = 2 \cdot \left(\arctan(e^S) - \frac{\pi}{4}\right) = 0.820535226 \text{ rad} \\ (= 47^\circ 00' 47.539422864'')$$

Kugellänge:
$$l = \alpha \cdot (\lambda - \lambda_0) = 0.0182840649 \text{ rad} \\ (= 1^\circ 02' 51.3591108468'')$$

Äquatorsystem (b, l) $\Rightarrow$ Pseudoäquatorsystem ($\bar{b}, \bar{l}$) (Rotation)

$$\bar{l} = \arctan\left(\frac{\sin l}{\sin b_0 \cdot \tan b + \cos b_0 \cdot \cos l}\right) = 0.0124662714 \text{ rad} \\ (= 0^\circ 42' 51.3530463924'')$$

$$\bar{b} = \arcsin(\cos b_0 \cdot \sin b - \sin b_0 \cdot \cos b \cdot \cos l) = 0.00192409259 \text{ rad} \\ (= 0^\circ 06' 36.8725855284'')$$

Kugel ($\bar{b}, \bar{l}$) $\Rightarrow$ Projektionsebene (y, x) (Mercator-Projektion)

$$Y = R \cdot \bar{l}$$

$$\begin{aligned} Y &= 79520.05 \\ y_{LV03} &= Y + 600000 = 679520.05 \\ y_{LV95} &= Y + 2600000 = 2679520.05 \end{aligned}$$

$$X = \frac{R}{2} \cdot \ln \left(\frac{1 + \sin \bar{b}}{1 - \sin \bar{b}} \right)$$

$$\begin{aligned} X &= 12273.44 \\ x_{LV03} &= X + 200000 = 212273.44 \\ x_{LV95} &= X + 1200000 = 1212273.44 \end{aligned}$$

Schweizer Projektionskoordinaten (y, x) $\Rightarrow$ ellipsoid. Koordinaten (φ, λ)

Als Beispiel wurde der Punkt Rigi (LV03) verwendet:

$$\begin{aligned} y &= 679520.05 \\ x &= 212273.44 \end{aligned}$$

Projektionsebene (y, x) $\Rightarrow$ Kugel ($\bar{b}, \bar{l}$)

$$\begin{aligned} Y &= y_{LV03} - 600'000 \\ X &= x_{LV03} - 200'000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y &= y_{LV95} - 2'600'000 \\ X &= x_{LV95} - 1'200'000 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 79520.05 \\ &= 12273.44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{l} &= \frac{Y}{R} && 0.01246627136 \text{ rad} \\ \bar{b} &= 2 \cdot \left[\arctan \left(e^{\frac{X}{R}} \right) - \frac{\pi}{4} \right] && 0.00192409259 \text{ rad} \end{aligned}$$

Pseudoäquatorsystem ($\bar{b}, \bar{l}$) $\Rightarrow$ Äquatorsystem (b, l)

$$b = \arcsin(\cos b_0 \cdot \sin \bar{b} + \sin b_0 \cdot \cos \bar{b} \cdot \cos \bar{l}) = 0.820535226 \text{ rad}$$

$$l = \arctan \left(\frac{\sin \bar{l}}{\cos b_0 \cdot \cos \bar{l} - \sin b_0 \cdot \tan \bar{b}} \right) = 0.0182840649 \text{ rad}$$

Kugel (b, l) $\Rightarrow$ Ellipsoid (φ, λ)

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + \frac{l}{\alpha} && = 0.148115967 \text{ rad} \\ &&& = 8^\circ 29' 11.111272'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1}{\alpha} \left[\ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{b}{2} \right) - K \right] + e \cdot \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\arcsin(e \cdot \sin \varphi)}{2} \right) \\ \varphi &= 2 \arctan(e^S) - \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Die Gleichungen für φ und auch S müssen **iterativ** gelöst werden. Als Startwert ist $\varphi = b$ zu empfehlen.

Die einzelnen Iterationsschritte ergeben folgende Ergebnisse:

0. Schritt:	S = 0	$\varphi = 0.820535226$
1. Schritt	S = 0.933114264192610	$\varphi = 0.821315364725524$
2. Schritt	S = 0.933117825679560	$\varphi = 0.821317791017021$
3. Schritt	S = 0.933117836751434	$\varphi = 0.821317798559814$
4. Schritt	S = 0.933117836785854	$\varphi = 0.821317798583263$
5. Schritt	S = 0.933117836785961	$\varphi = 0.821317798583336$
6. Schritt	S = 0.933117836785961	$\varphi = 0.821317798583336$
		$\varphi = 47^\circ 03' 28.956592''$