

Landesschwerenetz LSN



wohin

wissen

swisstopo

Geschichte des Landesschwerenetzes und
Resultate der Messungen von 2004–2022

Urs Marti



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo
www.swisstopo.ch

Titelbild: Relative Schweremessungen in Orsières (U. Marti)

ISBN 978-3-302-40126-3
EAN 9783302401263

Impressum

© 2024 Bundesamt für Landestopografie swisstopo

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

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Grundlagen	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Grundlagen zum Schwerefeld	1
1.3	Masseinheiten	2
1.4	Messmethoden und Instrumente	3
1.5	Kurzbeschreibung einiger Relativ-Gravimeter	3
1.6	Kurzbeschreibung einiger Absolut-Gravimeter	5
1.7	Gezeitenkorrektur, permanente Erdgezeiten	7
2	Zweck und Aufbau eines Landesschwerenetzes	9
3	Bisherige Schweremessungen in der Schweiz	10
3.1	Pendelmessungen	10
3.2	Das Schweregrundnetz 1953 (SGN53)	12
3.3	Die Testschleife 1955	13
3.4	Das REUN-Netz 1956	14
3.5	Das Schwerenetzt 1. Ordnung 1960-1966	15
3.6	Das Kontrollnetz 1968 (SKN68)	16
3.7	Das Kontrollnetz EKN76 und die Schwerekarte 1980	17
3.8	Das Schweregrundnetz 1983 (SNGN83)	20
3.9	Aerogravimetrie	21
3.10	Das Schweregrundnetz 1995 (SG95)	23
3.11	Der gravimetrische Atlas 1:100'000	25
3.12	Die Schweremessungen für das Landesnivellement	27
4	Internationale und ausländische Schwerenetze	29
4.1	Frühe Definitionen des Schweredatums	29
4.2	Das IGSN71	29
4.3	Europäische Schwerenetze	31
4.4	Die nationalen Schwerenetze der Nachbarländer	32
5	Konzept des Landesschwerenetzes	35
5.1	Zweck der Erneuerung	35
5.2	Zielsetzung und Grundkonzept	35
5.3	Netzentwurf des LSN	37
5.3.1	Netz 0. Ordnung	37
5.3.2	Kalibrationslinie Interlaken–Jungfraujoeh	39
5.3.3	Netz 1. Ordnung	40
5.3.4	Netz 2. Ordnung	41
5.3.5	Verdichtungsnetz 3. Ordnung	42
5.4	Punktnummerierung	43
5.5	Dokumentation der Punkte	44
6	Spezifikationen und Standards	46
6.1	Absolute Schweremessungen	46
6.2	Relative Schweremessungen	46
6.3	Höhen und Lagekoordinaten	47
6.4	Dokumentation, Unterhalt und Nachführung	47

7	Kategorisieren von Punkten	48
7.1	Ordnung	48
7.2	Identität mit LFP/HFP	48
7.3	Stationierbarkeit	48
7.4	Zufahrt	49
7.5	Stabilität	49
8	Durchgeführte Messungen	50
8.1	Aufbau 2003–2009	50
8.2	Unterhalt ab 2009	51
9	Absolutmessungen	53
9.1	Durchführen der Messung	53
9.2	Auswertung der Absolutmessungen	54
9.2.1	Beobachtungsgleichungen	54
9.2.2	Mittelbildung	55
9.2.3	Berücksichtigte Korrekturen	56
9.2.4	Messunsicherheit	57
9.3	Dokumentation der Resultate	58
9.4	Durchgeführte Absolutmessungen	59
9.5	Wiederholbarkeit der Messungen	61
10	Relativmessungen	64
10.1	Eingesetzte Instrumente	64
10.2	Vorbereitung der Messungen	64
10.3	Messablauf	64
10.4	Hysteresis	65
10.5	Instrumenten- und Sensorhöhe	66
10.6	Korrekturen der Relativmessungen	67
10.7	Kalibration der Relativgravimeter	67
10.7.1	Driftkalibration	67
10.7.2	Tiltkalibration	69
10.7.3	Skalenfaktor	72
11	Vertikalgradienten	75
11.1	Messen von Vertikalgradienten	75
11.2	Auswertung der Gradientenmessungen	76
11.3	Interpolation des Vertikalgradienten aus Massen	78
12	Gesamtausgleichung des LSN	81
12.1	Einleitung	81
12.2	Mathematisches Modell	81
12.2.1	Absolutmessungen	81
12.2.2	Relativmessungen	81
12.3	Datenaufbereitung	82
12.3.1	Die Rohdaten	82
12.3.2	SCITOGRAV	83
12.3.3	ETGTAB	84
12.3.4	Elimination von Messungen	85
12.3.5	Manuelle Veränderungen von Messungen	85
12.4	Input-Files von GRAVNET	86

12.4.1	File der Absolutmessungen	86
12.4.2	File der Relativmessungen	86
12.4.3	File der Stationen	87
12.4.4	File der Instrumente	87
12.4.5	File der Skalenfaktoren	88
12.5	Optionen von GRAVNET	88
12.5.1	Vertikalgradient	88
12.5.2	Schätzen von Skalenfaktoren	89
12.5.3	Dämpfungsfaktor der Relativmessungen	89
12.6	Output von GRAVNET	89
12.7	Das Programm GRAVNIV	89
12.8	Zusammenfassung der Ausgleichungen	91
13	Vergleich mit früheren Schwerenetzen	93
14	Zusammenfassung, Ausblick	98
15	Danksagung	99
	Referenzen	100
	Anhang	I
A1	Stationscharakteristiken	II
A2	Koordinaten der Punkte in LV95/LN02 und ETRS89	XII
A3	Schweren der Punkte	XXI

1 Einleitung und Grundlagen

1.1 Einleitung

Unter den raumbezogenen physikalischen Effekten gehört die Schwere zu den am leichtesten erkennbaren. Einerseits kann der Schwerevektor eines Ortes als relevantes Signal für die Untersuchung der räumlichen Verteilung der Massen in der näheren und weiteren Umgebung des Punktes dienen. Beispiele dazu sind die Verwendung von Schwereanomalien bei der geologischen Landesaufnahme oder bei der geophysikalischen Exploration oder anderen Untersuchungen des Untergrundes. Andererseits werden verschiedene physikalische Messungen mehr oder weniger stark vom Schwerefeld und dessen räumlichen und zeitlichen Variationen beeinflusst. Dies betrifft fast alle geodätischen Messungen wie Nivellement, Höhenwinkel, Kreiselazimute, horizontale Richtungsmessungen und indirekt auch Distanzmessungen und GNSS (über die Satellitenbahnen). Jedes simple Senkblei und jede Wasserwaage richten sich nach dem Schwerefeld aus. In geodätischen Anwendungen treten die Schwerefeldbeeinflüsse meist als Störungen (noise) auf und müssen in geeigneter Weise berücksichtigt oder eliminiert werden. Im Bereich der Metrologie (z.B. Waagen, Kraftmessung, Druckmessung) wirkt die Schwerebeschleunigung als Massstabsfaktor, welcher eine Kraft mit einer Masse verknüpft und somit erlaubt, aus der Masseneinheit viele weitere physikalische Einheiten abzuleiten.

Eine grosse Bedeutung haben die Äquipotentialflächen des Schwerefeldes in der Geodäsie und Landesvermessung – insbesondere natürlich das Geoid, d.h. jene Äquipotentialfläche, welche mit dem mittleren Meeresspiegel zusammenfällt. Diese Bezugsfläche wird zur Definition der schwerefeldbezogenen Höhensysteme verwendet.

Ziel der gravimetrischen Landesvermessung ist die genaue Kenntnis über das Schwerefeld in einem bestimmten Raum. Dazu gehören neben dem Schwerepotential in jedem Punkt auf, über oder unter der Erde auch die Richtung (Lotabweichungen) und die Beträge der Schwerevektoren sowie deren zeitliche Veränderungen.

1.2 Grundlagen zum Schwerefeld

Das Schwerefeld der Erde ist ein konservatives Kraftfeld und wird durch das Potentialfeld beschrieben. Der Schwerevektor ist der Gradient des Potentials und ist durch seinen Betrag (Schwere) und seine Richtung (Lotabweichung) bestimmt.

Mit geodätischen Methoden messbar sind der Betrag des Schwerevektors (Gravimetrie), die Richtung des Schwerevektors (Astronomie und GNSS) sowie Potentialdifferenzen (Nivellement und Gravimetrie).

Das Schwerefeld der Erde wird in erster Linie durch die Newton'sche Gravitationskraft verursacht, durch welche sich zwei (punktförmige) Massen anziehen. Die Grundlage ist die bekannte Formel:

$$F = \Gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Mit: F: Gravitationskraft

Γ : Gravitationskonstante = $6.67430 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$

m_1, m_2 : Massen der beiden Körper

r: Abstand der beiden Körper

An der Erdoberfläche können wir als erste Näherung für m_1 die Masse der Erde ($m_E \sim 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) und für r den mittleren Erdradius ($\sim 6371 \text{ km}$) einsetzen. Das ergibt $F \approx 9.82 \text{ ms}^{-2} \cdot m_2$. Die Gravitationskraft ergibt sich also durch Multiplikation der Masse m_2 mit der Gravitationsbeschleunigung v. Für genauere Berechnungen muss in erster Linie die Ellipsoidform der Erde berücksichtigt werden. Als Konvention gelten dazu bis heute die Werte des «Geodetic Reference System 1980» (GRS80) mit einer grossen Halbachse $a = 6378137.00 \text{ m}$ und einer Abplattung $f = 1/298.257222101$ (abgeleitet vom definierenden «dynamischen Formfaktor» $J_2 = 108263 \cdot 10^{-8}$).

Auf der Erde tritt in den Formeln zum Schwerefeld immer das Produkt $\Gamma \cdot m_E$ auf, welches sich sehr viel genauer bestimmen lässt als die einzelnen Komponenten. Deshalb wird diese «geozentrische Gravi-

tationskonstante» GM üblicherweise in einem geodätischen Referenzsystem als definierende Grösse festgelegt. Im GRS80 gilt $GM = 3986005 \cdot 10^8 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$.

Da sich die Erde einmal im Tag um ihre eigene Achse dreht, muss noch der Einfluss der Zentrifugalbeschleunigung berücksichtigt werden. Deren Vertikalkomponente z beträgt für eine Kugel mit Radius r:

$$z = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos^2 \varphi$$

φ bezeichnet hier die geozentrische Breite des Punktes. Mit der Winkelgeschwindigkeit der Erde ($\omega = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/sec}$ in GRS80) ergibt sich z am Äquator zu -0.034 ms^{-2} . An den Polen ist $z = 0$. Für exakte Berechnungen muss natürlich auch hier die Abplattung berücksichtigt werden.

Die totale Schwerebeschleunigung g ergibt sich dann aus der Summe von Gravitations- und Zentrifugalbeschleunigung: $g = v+z$.

Da nun die Erde nicht eine homogene Kugel ist, sondern eine unregelmässige Massenverteilung aufweist, ist auch das tatsächliche Schwerefeld ziemlich unregelmässig. Hauptgründe für diese Unregelmässigkeiten sind neben der Abplattung vor allem die Topografie. In der folgenden Tabelle 1-1 sind die Hauptbestandteile des Schwerefeldes zusammengefasst, wobei noch zwischen stationären und variablen Komponenten unterschieden wird. Die Messgenauigkeit moderner Gravimeter (absolut und relativ) liegt in der Grössenordnung von 10^{-8} m/s^2 .

Eine weitere wichtige Unterteilung des Schwerefeldes wird noch gemacht, indem der Einfluss eines Standardmodells der Erde (Rotationsellipsoid, Normalschwerefeld inklusive Zentrifugalbeschleunigung) vom ganzen Rest (anomales Schwerefeld, Schwereanomalien) abgetrennt wird.

Tabelle 1-1: Grössenordnungen der Hauptbestandteile des Erdschwerefeldes

	ms^{-2}	Einfluss
stationär	10^0	sphärische Erde
	10^{-2}	Abplattung, Zentrifugalkraft
	10^{-4}	Gebirge, Täler, Ozeanrücken, Subduktionszonen
	10^{-5}	Dichteveränderungen in Kruste und Mantel
	10^{-6}	Salzdome, Sedimentbecken, Erzlager
variabel	10^{-6}	Gezeiten, Luftdruck
	10^{-7}	Grundwasseränderungen
	10^{-8}	Polschwankung, Meerestopografie
	10^{-9}	Generelle Relativität

1.3 Masseinheiten

Die Schwere ist in erster Linie eine Beschleunigung. Deshalb ist die übliche SI-Einheit ms^{-2} . Weitere, oft verwendete SI-Einheiten sind mms^{-2} , μms^{-2} und insbesondere für Genauigkeitsangaben auch nms^{-2} .

Aber in der Geodäsie und in der Geophysik ist die CGS-Einheit «Gal» (abgeleitet von Galileo) immer noch eine sehr häufig verwendete Einheit, obwohl sie seit 1978 nicht mehr offiziell für die Angabe von Beschleunigungen zugelassen ist. Dabei ist $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cms}^{-2}$. Insbesondere die davon abgeleiteten Grössen MilliGal ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$) und MikroGal ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$) sind noch sehr oft anzutreffen und werden auch in diesem Bericht so verwendet.

Für die Angabe von Schwerepotentialen wird die offizielle SI-Einheit m^2s^{-2} angewendet. Allerdings ist die Einheit GPU (Geopotential Unit, $1 \text{ GPU} = 10 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$) immer noch eine sehr verbreitete Einheit in Höhennetzen, um auf einfache Art Potentialunterschiede mit Höhendifferenzen (in Metern) vergleichen zu können. Gelegentlich findet man dafür auch noch die Einheit «kGal m» (KiloGal Meter), was zu GPU gleichwertig ist.

Die Richtung des Schwerevektors (Lotabweichung) wird üblicherweise in einer Winkleinheit (Bogen Sekunden oder cc) angegeben. Dabei wird die Horizontalkomponente des Schwerevektors durch den Betrag des Schwerevektors dividiert.

Für Schweregradienten ist die Einheit «Eötvös» ($1 E = 10^{-9} \text{ Gal/cm} = 10^{-4} \text{ mGal/m} = 1 \text{ nms}^{-2}/\text{m} = 10^{-9} \text{ s}^{-2}$) gelegentlich noch anzutreffen. Der Standardwert des vertikalen Schweregradienten (0.3086 mGal/m) beträgt also 3086 E.

1.4 Messmethoden und Instrumente

Die einfachste Methode, um die Schwerebeschleunigung g zu messen, ist der freie Fall. Eine Testmasse wird im Vakuum fallen gelassen und es wird die Zeit t gemessen, welche benötigt wird, um eine Strecke s zurückzulegen. Daraus ergibt sich $g = 2s/t^2$. Das Problem mit dieser Methode war aber, dass früher sowohl Zeit- als auch Längenmessungen nicht mit genügender Genauigkeit durchgeführt werden konnten.

Deshalb wurde bis in die 1960er Jahre die Pendelmethode bevorzugt, bei welcher ausgenützt wird, dass die Schwingdauer eines Pendels abhängig von der Schwerkraft ist. Aber auch diese Pendelapparate hatten sehr viele Schwierigkeiten mit systematischen Fehlern, welche vor allem mit der stabilen Aufhängung des Pendels zu tun hatten und durch verschiedene instrumentelle Modifikationen minimiert werden mussten. Viele der systematischen Fehler hoben sich bei der Differenzbildung zwischen zwei Stationen auf, was dazu führte, dass Schweredifferenzen relativ genau bestimmt werden konnten, die absolute Lagerung aber problematisch blieb.

In den 1940er Jahren kamen die ersten statischen Gravimeter auf (im Gegensatz zu den beweglichen Pendeln). Diese funktionieren nach dem Prinzip einer Federwaage und nutzen aus, dass sich die Länge einer Feder mit aufgehängter Testmasse bei unterschiedlicher Schwerkraft verändert. Diese Instrumente können nur Schwereunterschiede messen, sind also Relativgravimeter. Durch verschiedene mechanische Konstruktionen (Astasierung, Zero Length Spring) wird die Empfindlichkeit dieser Geräte gegenüber einer simplen Federwaage um mehrere Grössenordnungen gesteigert. Heutige Relativgravimeter erreichen eine Genauigkeit von wenigen μGal . Sie haben aber bis heute das Problem der teils unregelmässigen Geräterift, und dass Sprünge in den Messungen auftreten können. Gegenüber den Absolut-Gravimetern haben sie den grossen Vorteil der Transportabilität, Feldtauglichkeit und der einfachen Bedienung. Ein Spezialfall eines Relativ-Gravimeters sind die supraleitenden Gravimeter. Davon gibt es jedoch noch keine transportable Variante, und sie werden üblicherweise stationär und permanent zur hochpräzisen Beobachtung (im NanoGal-Bereich!) von Schwereänderungen eingesetzt.

Die ersten modernen Absolutgravimeter nach der Freifall-Methode kamen zu Beginn der 1960er-Jahre auf [Faller, 2002]. Ermöglicht wurde die Genauigkeitssteigerung durch den Einsatz von Interferometern. Weitere Genauigkeitssteigerungen erfolgten danach parallel mit dem technischen Fortschritt in der Distanz- (Laser) und Zeitmessung (Atomuhren). Eine Variante der Freifall-Gravimeter sind die Senkrecht-Wurf-Gravimeter (oder ballistische Gravimeter), bei denen die Testmasse nicht einfach fallen gelassen, sondern senkrecht nach oben katapultiert wird. Diese haben zumindest theoretisch gegenüber den Freifall-Gravimetern den Vorteil des symmetrischen Messweges. Die heutigen Absolutgravimeter erreichen eine Genauigkeit von wenigen μGal , was in internationalen Vergleichskampagnen bestätigt wurde. Zukünftige Entwicklungen zielen weniger auf eine Genauigkeitssteigerung, sondern eher auf die Transportabilität und die einfachere Bedienung ab. Eine neuere Entwicklung sind auch die «Cold Atom Gravimeter» (Quantum-Gravimeter), bei welchen die makroskopische Testmasse durch einzelne herabfallende Atome ersetzt wird.

1.5 Kurzbeschreibung einiger Relativ-Gravimeter

Das **Worden-Gravimeter** ist ein temperaturkompensiertes, astasiertes Relativgravimeter, entwickelt von Sam Worden in den 1930er Jahren und vertrieben durch Texas Instruments. Es war mit seinem Gewicht von nur etwa 2.5 kg das erste wirklich feldtaugliche Instrument. Es brauchte keine externe Batterie, da es nicht geheizt wurde, sondern über ein doppelwandiges vakuumisiertes Gehäuse aus Quarzglas stabilisiert wurde. Auch die ganze Feder-Einrichtung war aus Quarzglas. Zum Ablesen des Schwerewertes dienten 2 Stellschrauben mit einem Grobtrieb (grosse Schraube) und einem Feintrieb (kleine Schraube). Die angegebene Genauigkeit von einigen wenigen Hundertstel-Milligal konnte nur erreicht werden, wenn der Grobtrieb nicht bewegt wurde. Das schränkte aber auch den Messbereich auf etwa maximal 70 mGal ein. Worden-Gravimeter waren ab 1949 an der ETH Zürich und an der Universität Lausanne (in Zusammenarbeit mit der Universität Genf) im Einsatz und wurden ungefähr bis 1972 benutzt.

Relativgravimeter von **LaCoste&Romberg** (LCR) wurden ab Mitte der 1930er Jahre entwickelt, waren aber zu Beginn nicht wirklich feldtauglich. Sie bestehen im Gegensatz zu den Worden-Gravimetern aus Metall, was ihnen Vorteile in der Robustheit verleiht, müssen allerdings deshalb auch ständig auf eine konstante Temperatur geheizt werden. Ihre Besonderheiten sind die schräg angebrachte Feder in einer geheizten Kammer und das Prinzip der Zero-Length-Spring, was ihnen eine theoretisch nahezu unendlich grosse Genauigkeit verleiht. Eine kleine Schwereänderung verursacht eine relativ grosse Änderung der Lage der Testmasse. Das LCR-Modell G kam ab 1959 auf den Markt. Es war viel kleiner und leichter als seine Vorgänger und damit auch feldtauglich. Die G-Gravimeter haben eine nominelle Genauigkeit von 0.01 mGal und einen Messbereich, welcher die ganze Erde abdeckt. Die Modell-D Gravimeter gibt es seit 1968. Sie sind praktisch baugleich mit den G-Gravimetern, haben aber eine Ablesegenauigkeit von 1 μ Gal. Dafür haben sie aber einen Messbereich von nur etwa 200 mGal. LCR-Gravimeter werden grundsätzlich optisch abgelesen. Es gibt aber auch Feedback-Systeme, bei welchen der Messbalken immer in derselben Position gehalten wird und eine elektrostatische Rückstellkraft (Feedback) gemessen wird, welche nötig ist, um den Messbalken in Position zu halten.

Die LCR-Gravimeter dominierten für viele Jahrzehnte, bis dann auch andere Hersteller wie Scintrex, Micro-g oder ZLS markttaugliche Relativgravimeter anboten. Scintrex, Micro-g und LaCoste&Romberg haben sich zwischen 1999 und 2006 zu LRS (mit den Abteilungen LaCoste&Romberg-Scintrex für Relativgravimeter, sowie Micro-g LaCoste für Absolutgravimeter) zusammengeschlossen und beherrschen mehr als 90% des Marktes. **ZLS** (Zero Length Spring) ist eine Firma, die 1991 von ehemaligen LCR-Mitarbeitenden gegründet wurde. Deshalb erinnert ihr Relativgravimeter (Burris) zumindest optisch an die LCR-Gravimeter. Es ist aber abgesehen von den Grundprinzipien (Metallbauweise, Zero Length Spring) ein neu entwickeltes Instrument und seit ca. 2004 erhältlich.

Die kanadische Firma Scintrex wurde 1967 gegründet, begann aber erst 1989 mit der Produktion von quarz-basierten Relativgravimetern. Das erste Modell war das **Scintrex CG-3** mit einer nominellen Genauigkeit von 10 μ Gal. Eine Variante davon war das CG-3M, welches eine Genauigkeit im Bereich von 5 μ Gal erreichte. Sein Vorteil gegenüber den LCR-Gravimetern bestand insbesondere in der Kompaktheit: die Batterie war im Gehäuse integriert, und somit entfielen eine Transportbox und Kabelverbindungen während der Messung. Zudem enthielt das Instrument Neigungssensoren, welche eine Korrektur des gemessenen Schwerewertes erlaubten. Das CG-3 war computerbasiert mit einem 4-zeiligen LCD-Display und einem Speicher von 48 Kilobyte, was die Speicherung von etwa 1200 Messungen erlaubte.

2002 kam dann das **Scintrex CG-5** auf den Markt. Die Verbesserungen gegenüber dem CG-3 sind vor allem den Fortschritten in der Elektronik und der Computertechnik zu verdanken, was eine noch kompaktere Bauweise erlaubte. Der Sensor selbst blieb praktisch unverändert, allerdings gab es viele Neuerungen beim Feedbacksystem, der Temperaturstabilisierung oder der Tilt-Korrektur. Die erreichbare Genauigkeit beträgt etwa 5 μ Gal. Der Bildschirm ist nun ein VGA LCD-Bildschirm mit einer Auflösung von 320x240 Pixeln und das interne Memory beträgt 12 Megabyte. Auch war es möglich, einen GPS-Empfänger anzuschliessen für die grobe Positionsbestimmung und die Zeitsynchronisation.

Seit 2016 ist das **Scintrex CG-6** erhältlich. Es ist noch kompakter und leichter als das CG-5 und wird nun hauptsächlich über einen Tablet-PC bedient, der über Bluetooth mit dem Gravimeter verbunden ist. Der GPS-Empfänger ist nun ebenfalls im Gehäuse integriert. Auch am Sensor gab es einige Modifikationen, was insbesondere die Drift markant reduziert, mögliche Sprünge verkleinert und ein viel schnelleres Messen erlaubt. Die nominelle Genauigkeit wird nun mit $<5 \mu$ Gal angegeben.



Abbildung 1-1: Einige in der Schweiz eingesetzte Relativgravimeter. Obere Reihe: Worden, LaCoste&Romberg, Scintrex CG-3; untere Reihe: ZLS Burris, Scintrex CG-5, Scintrex CG-6

1.6 Kurzbeschreibung einiger Absolut-Gravimeter

Das italienische Metrologieinstitut IMGC (Istituto Metrologico Gustavo Colonnetti) in Turin (seit 2006 integriert in das Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica INRiM) hat ein eigenes Senkrechtwurf-Gravimeter entwickelt, welches etwa ab 1975 einsatzbereit war. Dieses Instrument wurde zwischen 1978 und 1980 für die ersten Absolutmessungen auf sieben Stationen in der Schweiz eingesetzt [Kahle et al. 1981]. Später erfolgten damit nach einigen Modifikationen noch drei weitere Messungen in der Schweiz (1987 Wiederholungsmessung in Guspisbach; 1997 Messungen in Zimmerwald und am METAS). 2003 wurde ein völlig neues Instrument gebaut, welches den Namen **IMGC-2** erhielt.

Die Entwicklung der Absolutgravimeter wurde ab den 1960er Jahren vor allem durch die Arbeiten von J. Faller geprägt, welcher das Interferometer in die Freifall-Instrumente einführte. Dadurch konnte die Fallkammer stark verkürzt werden, und die Instrumente wurden erstmals transportabel. Das erste halbwegs kommerzielle Freifall-Gravimeter, welches aus diesen Arbeiten entstand, war 1986 das **JILAg** (Joint Institute for Laboratory Astrophysics an der University Boulder, Colorado), von welchem 6 Exemplare angefertigt wurden. Eines davon wurde gemeinsam von 7 Institutionen in Österreich erworben und vom BEV verwaltet. Dieses Instrument (JILAg-6) wurde 1994 in der Schweiz für die Messungen auf 5 Punkten eingesetzt.

Die Technologie des JILAg wurde Mitte der 1990er Jahre an eine kommerzielle Firma (zunächst AXIS, später Micro-g) unter der Leitung von T. Niebauer übergeben. Daraus entstand ab 1995 das **FG5**, welches inzwischen zum Quasi-Standard der absoluten Schweremessung wurde und weltweit eingesetzt wird. 1999 beschaffte das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) ein solches Gerät, welches bis heute das einzige Absolutgravimeter in der Schweiz ist.

Von demselben Hersteller (Micro-g) entstand ab 2000 ein feldtaugliches Absolutgravimeter unter dem Namen **A10**, welches ebenfalls eine recht grosse Verbreitung fand, aber gegenüber dem FG5 eine

reduzierte Genauigkeit (im Bereich von 10-20 μGal) aufweist. Eine weitere Variante von Micro-g ist das FGL, ein kleineres und leichteres Modell als das FG5; es ist seit 2005 erhältlich und erreicht eine Genauigkeit von etwa 10 μGal . Als Weiterentwicklung des FG5 entstand 2012 das **FG5-X**, welches neben der Steuerelektronik vor allem Neuerungen in der Fallkammer aufweist. Auch das METAS hat 2012 sein FG5 zu einem FG5-X umgerüstet.

Daneben gibt es noch einige weitere Absolutgravimeter, welche aber Einzelanfertigungen sind. Zu erwähnen sind Instrumente aus Russland (GABL), der Ukraine (Senkrechtwurf-Instrument TBG), China (NIM, T1), Japan (JGSJ, NAO), Polen (günstiges Senkrechtwurf-Instrument ZZG) oder Deutschland (MPG).

Führende Arbeiten in der Entwicklung von Quanten-Gravimetern (oder Cold Atom Gravimeter) wurden vor allem in Frankreich durchgeführt: beispielsweise von LNE-SYRTE mit einem seit 2009 operablen Instrument oder mehrere Instrumente von ONERA (GIRAFE, seit 2012), welche auch schon auf Schiffen und Flugzeugen eingesetzt wurden. Die Start-Up Firma μQUANS bietet seit 2016 das erste kommerzielle Quantengravimeter AQG an, welches sehr kompakt, schnell und teilweise auch feldtauglich ist. Daneben gibt es aber auch in anderen Ländern Aktivitäten auf dem Gebiet der Quantengravimetrie (USA, Russland, China, Deutschland, England, Italien, Singapur, Neuseeland, Japan, ...).



Abbildung 1-2: Einige Absolutgravimeter: obere Reihe: IMGC, JILAg, FG5; untere Reihe: FG5-X, A10, μQUANS Absolute Quantum Gravimeter AQG

1.7 Gezeitenkorrektur, permanente Erdgezeiten

Die Gravimetermessungen liefern eine Momentaufnahme der aktuellen Schwere. Damit die Resultate vergleichbar werden, müssen sie um den Einfluss von variablen Anteilen korrigiert werden. Die wichtigste solche Korrektur ist die Gezeitenkorrektur. Sie berücksichtigt die wechselnde Anziehungskraft von Sonne und Mond, welche bis etwa 0.28 mGal betragen kann. Theoretisch lässt sich dieser Einfluss aus der bekannten Position der Himmelskörper und deren Massen berechnen. Da die Erde aber nicht ein starrer Körper ist, sondern sich elastisch verformt, wird die Berechnung komplizierter. Durch die Verformung des festen Erdkörpers und der Wassermassen der Ozeane entstehen zusätzliche Anziehungskräfte, welche berücksichtigt werden müssen. Streng genommen spricht man von Erdgezeiten, wenn von der Verformung der festen Erde gesprochen wird. Bei den ozeanischen Gezeiten wird vor allem die Verschiebung der Wassermassen der Ozeane betrachtet. Aber auch diese ozeanischen Gezeiten führen zu zusätzlichen Deformationen der festen Erde und Veränderungen der Schwerkraft, welche als «Ocean Loading» bezeichnet werden. Ocean Loading ist um eine Grössenordnung kleiner als die direkte Anziehung von Mond und Sonne, muss aber bei hochpräzisen gravimetrischen Messungen ebenfalls berücksichtigt werden.

Die wichtigsten in der Gezeitenkorrektur auftretenden Wellenlängen (Perioden) sind ungefähr 12 Stunden, 24 Stunden und 14 Tage. Das vollständige Gezeitensignal enthält aber noch sehr viele weitere Anteile. Die Amplituden und Phasen sind ortsabhängig. Die Gezeitenkorrekturen lassen sich aus globalen Modellen oder aus den Beobachtungen eines Gezeitengravimeters berechnen. Zudem ist es so, dass der Mittelwert der Gezeitenwirkungen nicht 0 ist, sondern ein permanenter Anteil bestehen bleibt. In der Geometrie wirkt sich dies hauptsächlich auf eine Verstärkung der Abplattung des Erdellipsoids aus. In der Gravimetrie ist dies ähnlich, wobei in erster Linie eine breitenabhängige Schwereänderung verursacht wird. Je nachdem, wie dieser permanente Anteil berücksichtigt wird, unterscheidet man verschiedene Gezeitensysteme, die sowohl in der Geometrie (Position und Höhe von Punkten) als auch in der Gravimetrie (Schwerkraft, und eigentlich auch bei Lotabweichungen) eine Rolle spielen.

Beim «**Tide-Free**»- oder «**Non-Tidal**»-System wird der permanente Anteil so reduziert, wie wenn Sonne und Mond nicht vorhanden wären. Deren Einfluss wird also völlig eliminiert. Das führt zu einer kleineren Abplattung des Ellipsoids und zu einer etwas grösseren Schwere am Äquator. Dieses System ist ziemlich weit von der Realität entfernt, hat aber trotzdem seine Bedeutung, da bei der strengen Geoidbestimmung nach Stokes alle Einflüsse ausserhalb des Erdkörpers subtrahiert werden müssen. Die Koordinaten der internationalen GNSS-Koordinaten (ITRS, ETRS89) werden im Tide-Free-System angegeben.

Das «**Mean-Tide**»-System enthält den permanenten Anteil von Mond und Sonne sowohl in der Geometrie als auch in der Schwere. Es entspricht am ehesten der Realität und dem mittleren Meeresspiegel. Auch in den Höhensystemen ergeben sich natürlicherweise im Mittel Höhen in diesem System, falls das Nivellement nicht um den Einfluss der Gezeiten korrigiert wird. Mean-Tide verursacht bei der Geoidbestimmung aber Probleme, da noch Massen ausserhalb des Erdkörpers enthalten sind (Potentialfeld des mittleren Erdkörpers plus Potentialfeld von Sonne und Mond).

«**Zero-Tide**» ist ein Kompromiss der beiden anderen und löst das Problem in der Geoidbestimmung. Es betrifft nur die Gravimetrie. In der Geometrie entspricht das Zero-Tide dem Mean-Tide-System. In Zero-Tide wird nur der direkte Einfluss der Anziehungskraft von Mond und Sonne subtrahiert; der indirekte Effekt, welcher durch die Deformation der elastischen Erde entsteht, wird beibehalten. Das heisst, dass das Potentialfeld in Zero-Tide demjenigen des mittleren Erdkörpers entspricht.

Erstmals aufgegriffen wurde dieses Thema der Gezeitensysteme von der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) 1979, und das Tide-Free-System wurde in der Resolution Nr. 15 angenommen. Dies war eine Reaktion darauf, dass einige Leute darauf aufmerksam machten, dass das bis anhin verwendete Mean-Tide-System Probleme für die Stokes-Formel in der Geoidbestimmung verursachte. Daraufhin wendeten aber andere Geodäten ein, dass das Tide-Free-System zu weit von der Realität entfernt und deshalb ungeeignet für ein mittleres Erdmodell sei. Daraufhin hat die IAG ihre Haltung revidiert und bereits 1983 in der Resolution Nr. 9 das Zero-Tide-System für Potentialfeld-Berechnungen und in Resolution Nr. 16 das Mean-Tide-System für die Geometrie empfohlen. Bis heute werden aber alle Systeme parallel zueinander verwendet.

Diese ganze Diskussion um die Gezeitensysteme hat für das Landesschwerenetz (LSN) insofern eine Bedeutung, als dass man wissen muss, in welchem System die Absolutmessungen vorliegen. Bei Relativmessungen fällt der Unterschied nicht ins Gewicht, da der grösste Teil bei der Differenzbildung herausfällt.

Heute werden alle Absolutmessungen auf das Zero-Tide-System reduziert. Das heisst, dass auch das LSN in Zero-Tide gerechnet wird. Alle älteren Absolutmessungen liegen aber in der Regel im Mean-Tide-System vor. Wenn man also auch ältere Messungen (vor 1983, z.B. Daten, welche auf dem IGSN71 basieren, oder die Absolutmessungen in der Schweiz 1978–1980) verwenden möchte, so müssen diese zunächst konvertiert werden. Die Formel dazu ist:

$$g_{MT} - g_{ZT} = -30.49 + 90.95 \sin^2 \varphi + 0.31 \sin^4 \varphi \quad [\mu Gal]$$

In ihrer originalen Form, wie sie auch für die Reduktion der Absolutmessungen 1978–1980 verwendet wurde, lautete diese sogenannte «Honkasalo-Korrektur» noch folgendermassen:

$$g_{MT} - g_{ZT} = -0.037(1 - 3\sin^2 \varphi) \quad [mGal]$$

mit den Schwerewerten g_{MT} (Mean-Tide) und g_{ZT} (Zero-Tide) in den entsprechenden Gezeitemsystemen und der geografischen Breite φ .

2 Zweck und Aufbau eines Landesschwerenetzes

Der Hauptzweck eines Landesschwerenetzes (oder nationalen Schweregrundnetzes) besteht im Bereitstellen einer einheitlichen Grundlage für alle relativen gravimetrischen Messungen für die Geodäsie und die Geophysik. Ähnlich wie für geodätische Netze in Lage und Höhe benötigen auch die Benutzer von Relativgravimetern ein möglichst genaues übergeordnetes Fixpunktfeld, auf welche sie ihre Schweremessungen beziehen können.

Das Schweregrundnetz wird durch vermarktete stabile Punkte realisiert, deren absolute Schwerewerte mit grosser Genauigkeit bekannt sind. Die Lagekoordinaten der Punkte müssen nur mit einer Genauigkeit von einigen Metern bekannt sein, und auch die Höhe wird für die eigentliche Aufgabe – die Benutzung als Anschlusspunkte – nicht benötigt. Für weitere Verwendungszwecke der Punkte des Schweregrundnetzes (z.B. Schwereinterpolation, Geoidbestimmung oder geodynamische Untersuchungen) und zur Überwachung von Schwereänderungen ist es jedoch vorteilhaft, wenn eine möglichst grosse Anzahl gut bestimmte Lagekoordinaten und Höhen aufweist.

Ein modernes Schweregrundnetz stützt sich auf einige hochpräzise absolute Schweremessungen mit Genauigkeiten in der Grössenordnung von 2 μGal . Dieses Rückgrat kann durch wiederholte genaue Relativmessungen zu weiteren Punkten verdichtet werden.

Moderne Absolutgravimeter werden regelmässig in Vergleichskampagnen untereinander verglichen und liefern die Schwere direkt – ohne grössere systematische Fehler und mit hoher Genauigkeit. Damit entfällt der Anschluss an ein übergeordnetes internationales Netz. Dennoch ist es üblich, die nationalen Schweregrundnetze untereinander durch Relativmessungen zu verbinden. Dies ermöglicht eine zusätzliche Kontrolle und die Berechnung eines übergeordneten kontinentalen Netzes.

Neben dem Schweregrundnetz werden auch die Schweremessungen, welche für die strenge Ausgleichung von Nivellementnetzen benötigt werden, in diesem Bericht erwähnt. Diese Messungen auf Haupt- und Hilfspunkten des Landesnivellements sind für die Berechnung von geopotentiellen Koten, von orthometrischen Höhen und von Normalhöhen unverzichtbar. Diese Punkte sind mit ihren gemessenen Schwerewerten ein Bestandteil eines modernen Höhenrahmens und werden auch dort dokumentiert. Sie sind nicht eigentlicher Bestandteil des Landesschwerenetzes.

Ebenfalls nicht als Bestandteil des Landesschwerenetzes werden die umfangreichen Relativ-Messungen für die gravimetrische Landesaufnahme [Klingelé und Olivier, 1980] oder für die Arbeiten zum Gravimetrischen Atlas der Schweiz 1:100'000 [Olivier et al., 2010] betrachtet. Diese Punkte sind zwar auch für die Landesvermessung wichtig (Geoidbestimmung, Schwereinterpolation), werden aber vor allem in der Geophysik verwendet. Ebenfalls nicht zum Landesschwerenetzen werden die Messungen für weitere Aufgaben (wie z.B. Aerogravimetrie, Exploration, Mikrogravimetrie, Archäologie) gezählt. Aber auch diese Daten werden beim Bundesamt für Landestopografie swisstopo dokumentiert und verwaltet, sofern sie für die Landesvermessung nützlich sind. Dies ist aber im vorliegenden Bericht nicht beschrieben.

3 Bisherige Schweremessungen in der Schweiz

3.1 Pendelmessungen

Seit ihrer Gründung 1861 betrachtete die Schweizerische Geodätische Kommission (SGK) die Bestimmung der Schwerkraft als eine ihrer zentralen Aufgaben. So wurde bald ein Repsold'sches Reversionspendel beschafft, womit in den 1860er und 1870er Jahren von E. Plantamour einige Punkte an Sternwarten und auf Triangulationspunkten absolut beobachtet wurden. Dazu gehörten Punkte an den Sternwarten von Genf, Bern und Neuchâtel und die Punkte auf Rigi, Gäbris, Simplon und dem Weissenstein (s. Plantamour 1866, 1872 und 1873). Aus Wiederholungsmessungen wurde eine Genauigkeit von ± 2 mGal berechnet. Später zeigte es sich jedoch, dass die Resultate stark systematisch verfälscht waren. Nach dem Tod von Plantamour (1882) ruhten die Schweremessungen einige Zeit, und die Schwerpunkte der SGK lagen mehr in der Erstellung des Triangulations- und Höhennetzes. Ab 1887 wurden von Scheiblauber und Messerschmitt die Schweremessungen wieder aufgenommen. Sie bestimmten mit dem Reversionspendel aber nur noch eine einzige absolute Schwere an der Sternwarte von Zürich (1889), welche fortan als Fundamentalstation des Schwerenetzes dienen sollte.

Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Bestimmung des Geoids in vielen Ländern ein Hauptziel der Geodäsie. In der Schweiz wurden dazu in erster Linie Lotabweichungsmessungen im Triangulationsnetz durchgeführt. Man erkannte aber auch die Bedeutung von Schweremessungen, da sie eine unabhängige, weitere Information und Kontrolle waren und zur Reduktion der Nivellement-Messungen nötig waren. Zudem waren sie auch etwas weniger aufwändig als die astronomischen Messungen. 1891 beschaffte sich die SGK einen Sterneck'schen Pendelapparat (Abbildung 3-1; Beschreibung s. Messerschmitt, 1897). Dieser war einfacher zu bedienen, leichter transportierbar und feldtauglicher als sein Vorgänger. Dieses Gerät wurde aber in erster Linie zur Bestimmung von Schwereunterschieden entwickelt, da die Ungenauigkeiten in der Zeit- und Längenmessung viel zu gross waren, um absolute Werte zu bestimmen. Bei der Differenzbildung wurden jedoch viele systematische Anteile eliminiert. Sterneck gilt deshalb als Erfinder der relativen Schweremessung.

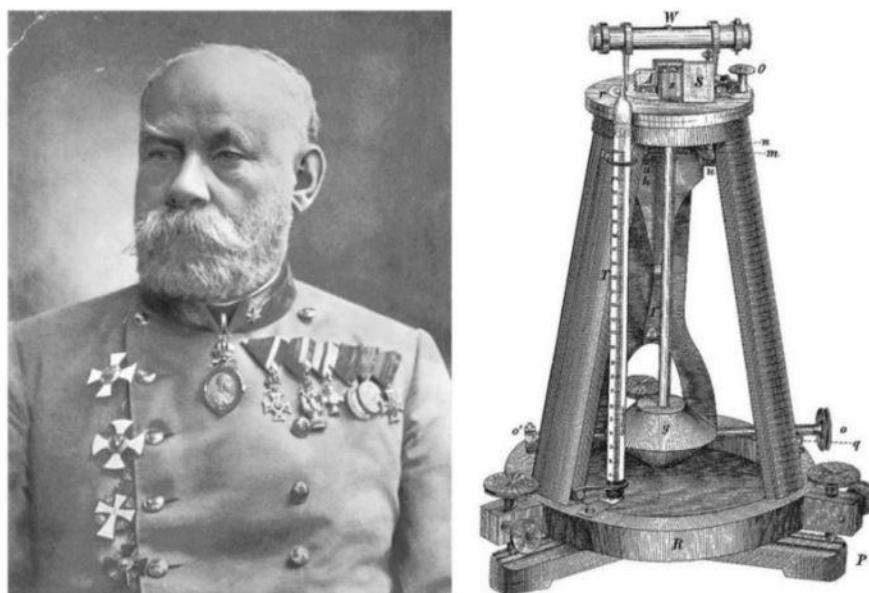


Abbildung 3-1: Robert Daublebsky von Sterneck und eine Zeichnung seines Pendelapparats

Ein erstes grösseres Netz von relativen Schweremessungen mit dem Sterneck'schen Pendelapparat wurde in den Jahren 1892–1896 gemessen [Messerschmitt, 1897]. Dieses Netz umfasste etwa 70 Punkte (Abbildung 3-2), wovon die meisten an Sternwarten und in der Nähe von Triangulationspunkten höherer Ordnung lagen. Zwischenpunkte wurden vor allem entlang der Visurlinien der Triangulation 1. Ordnung gelegt, um den Verlauf der Lotabweichung genauer zu studieren. Gleichzeitig mit den Schweremessungen führte Messerschmitt auch auf allen Stationen astronomische Messungen durch. Für die absolute Lagerung der Schwere wurden Anschlussmessungen in Wien, Strassburg und München durchgeführt und daraus der für den schweizerischen Fundamentalpunkt an der Sternwarte Zürich gültige Wert von $g=980'674$ mGal

abgeleitet. Als zweite gleichwertige Fundamentalstation wurde am Bernoullianum Basel $g=980'795$ mGal festgelegt. Für alle Stationen wurden erstmals in der Schweiz auch Schwereanomalien gerechnet, welche vor allem von Geologen und Geophysikern zur Interpretation des Aufbaus des Erdinnern benutzt wurden (Abbildung 3-3).

Ab 1900 übernahm Theodor Niethammer im Auftrag der SGK die Schweremessungen. Ziel seiner Arbeiten war eine flächendeckende Bestimmung der Schwerkraft für die Zwecke des Landesnivellements und für geophysikalische Interpretationen des geologischen Untergrundes.

Die Messungen begannen 1900 mit dem Anschluss der Fundamentalstationen Zürich und Basel an Potsdam, Karlsruhe und Strassburg. Für alle weiteren Stationen wurde dann der Schwerewert in Basel ($g=980'788$ mGal, ab 1903 anderer Punkt als in Messerschmitt, 1897) im Potsdamer System als Referenz verwendet. Der daraus abgeleitete Wert an der Sternwarte Zürich betrug $980'675$ mGal.

Insgesamt wurden bis 1918 231 Stationen in der Schweiz und im benachbarten Ausland gemessen (Abbildung 3-2), die in den SGK-Bänden 12, 13, 15 und 16 dokumentiert sind. Die ausgewiesene Genauigkeit der Messungen von ca. 1 mGal war für jene Zeit ausserordentlich gut und bis dahin eine weltweit unerreichte Leistung. Diese Genauigkeit wurde lange angezweifelt, konnte aber nachträglich durch Verbindungsmessungen mit statischen Gravimetern in den 1950er Jahren [Hunziker, 1959] bestätigt werden.

Pendelmessungen wurden in der Schweiz vereinzelt noch durch ausländische Institutionen bis in die 1950er Jahre durchgeführt, vor allem für die Verbindung der Sternwarten mit ausländischen Schwerestationen und als Beitrag für die internationalen Schwerenetze. Sie verloren aber relativ rasch an Bedeutung durch das Aufkommen der statischen Gravimeter und dann Ende der 1960er Jahre durch die neuen ballistischen und Freifall-Absolutgravimeter.

Eine übersichtliche Zusammenfassung der Pendelmessungen und deren Interpretation ist in [Kobold 1962, Kapitel 4 von E. Hunziker] gegeben.

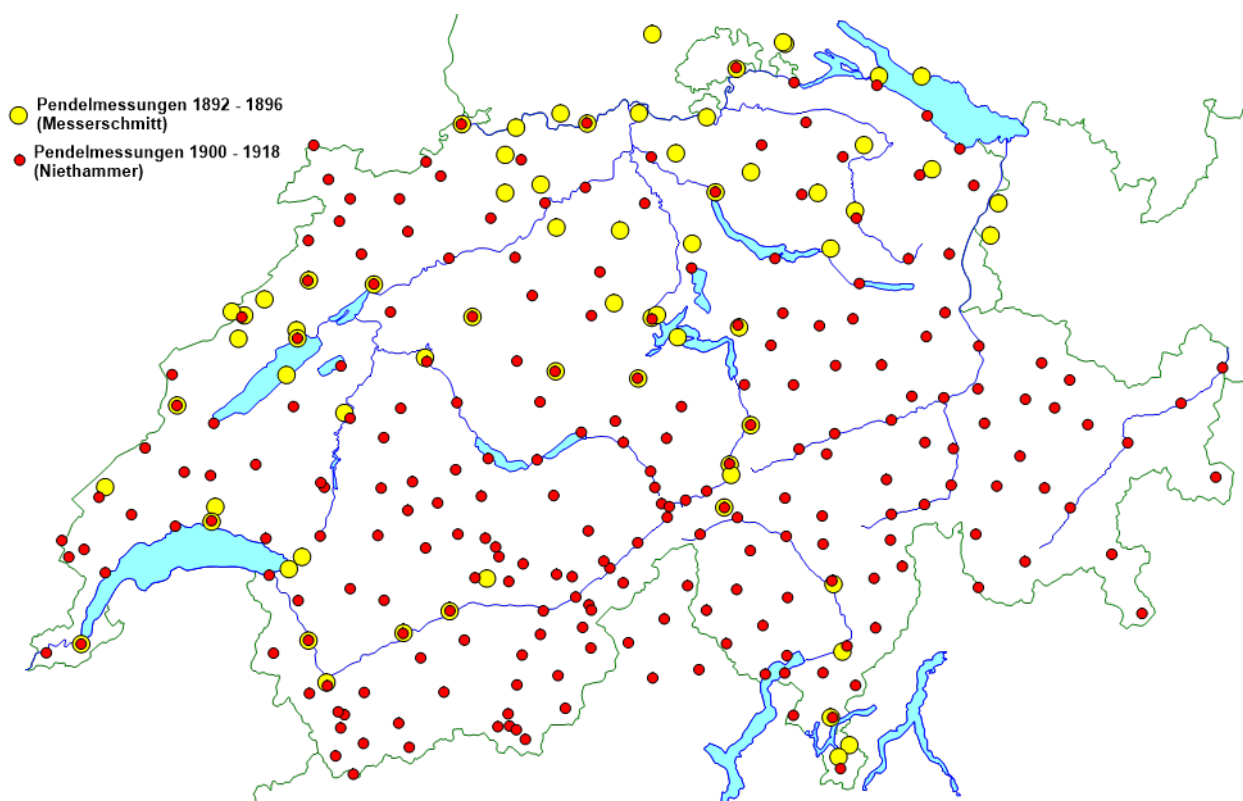


Abbildung 3-2: Pendelmessungen 1892–1896 (Messerschmitt) und 1900–1918 (Niethammer)

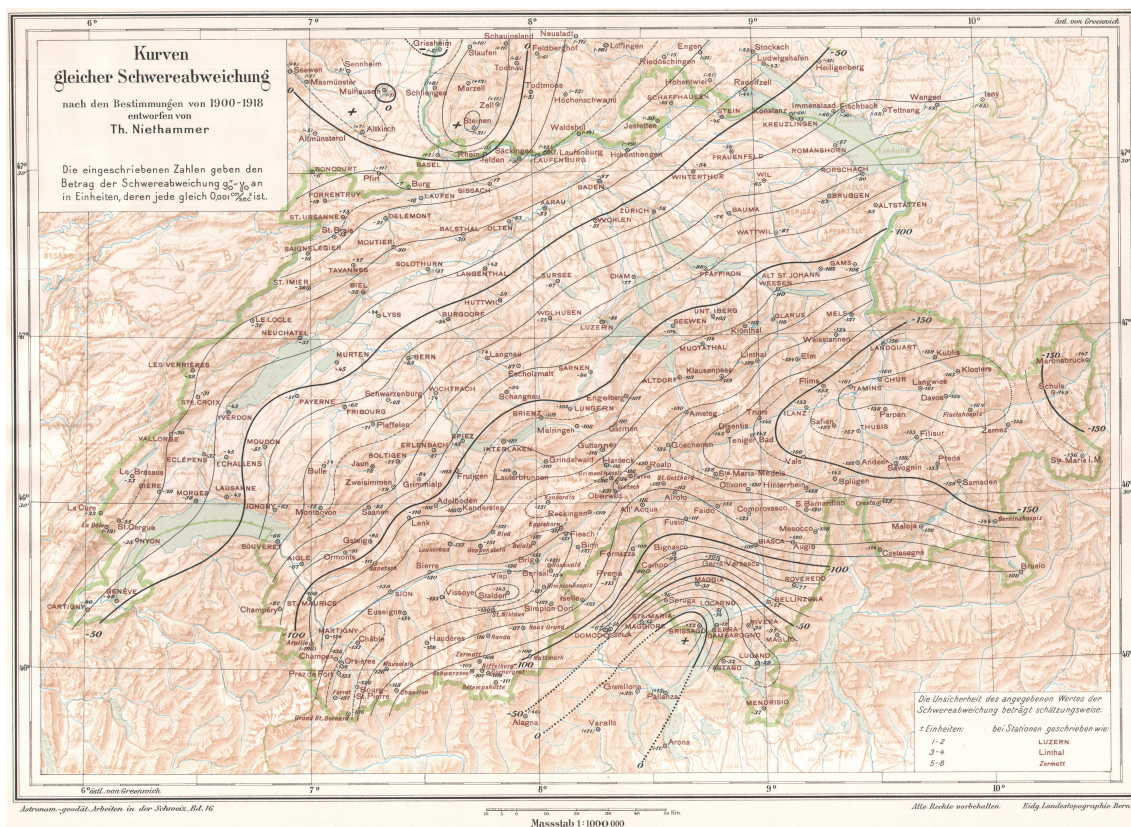


Abbildung 3-3: Von Theodor Niethammer 1921 publizierte Karte der Schwereanomalien

3.2 Das Schweregrundnetz 1953 (SGN53)

Die durchgeführten Pendelmessungen des 19. und frühen 20. Jahrhunderts (bis 1918) mit einer Genauigkeit von ca. 1 mGal genügten um 1950 den Anforderungen der Geodäsie und der Geophysik nicht mehr. 1953 beschloss die Schweizerische Geodätische Kommission deshalb in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik der ETH Zürich und der Eidgenössischen Landestopographie, ein Schweregrundnetz zu messen [Hunziker, 1959]. Die Genauigkeit sollte gegenüber den bisherigen Pendelmessungen um mindestens einen Faktor 10 gesteigert werden. Dies wurde durch die damals neu aufkommenden, statischen Gravimeter vom Typ Worden ermöglicht. Ein erstes solches Instrument in der Schweiz wurde 1949 von der ETH Zürich beschafft.

Das Schweregrundnetz 1953 (SGN53) besteht vor allem aus Punkten des Landesnivellements. Hinzu kamen die Flughäfen Zürich, Locarno und Genf (Messung erst 1957), um den Anschluss an die bekannten Schwerestationen des Auslandes zu ermöglichen. Daneben wurden einige Eichstrecken (insbesondere Interlaken–Jungfrauoch 1954) und 44 Verbindungen zu den alten Pendelstationen gemessen. Als Ersatz für die nicht mehr zugängliche frühere Fundamentalstation Basel-Bernoullianum wurde an der neuen Sternwarte in Binningen ein Punkt mit dem SGN53 verbunden. Bei den Anschlussmessungen von Genf (1957) wurde auch der Repère Pierre du Niton erstmals gravimetrisch bestimmt.

Gemessen wurden 1953 und 1954 insgesamt 123 Stationen auf 7 geschlossenen Nivellementschleifen (Abbildung 3-4) und 2 offenen Zügen (Bellinzona–Brissago und Martigny–Grand St. Bernard). Da das eingesetzte Worden-Gravimeter auf der höchsten Präzisionsstufe nur einen Messbereich von ca. 70 mGal aufwies, wurde darauf geachtet, dass die Schweredifferenz zweier benachbarter Stationen 50 mGal nicht überschritt. Im Flachland sollte die Distanz zwischen den Stationen nicht grösser als 30 km sein, um die Messzeit kurz zu halten und somit Gerätedrift und Gezeitenkorrektur linear ansetzen zu können. Gelagert wurde das Netz auf der Fundamentalstation in Zürich (Geodätisches Institut der ETH im Hauptgebäude) mit einem Wert von 980'667 mGal, welcher wiederum vom Wert der alten Pendelstation an der Sternwarte Zürich im Potsdamer System abgeleitet und durch Anschlüsse im Ausland kontrolliert wurde. Die Genauigkeit der ausgeglichenen Schwerewerte des SGN53 wird mit einigen wenigen Hundertstel-mGal (0.01-0.06) gegenüber der Fundamentalstation aus einer nachträglichen Gesamtausgleichung angegeben [Hunziker, 1962].

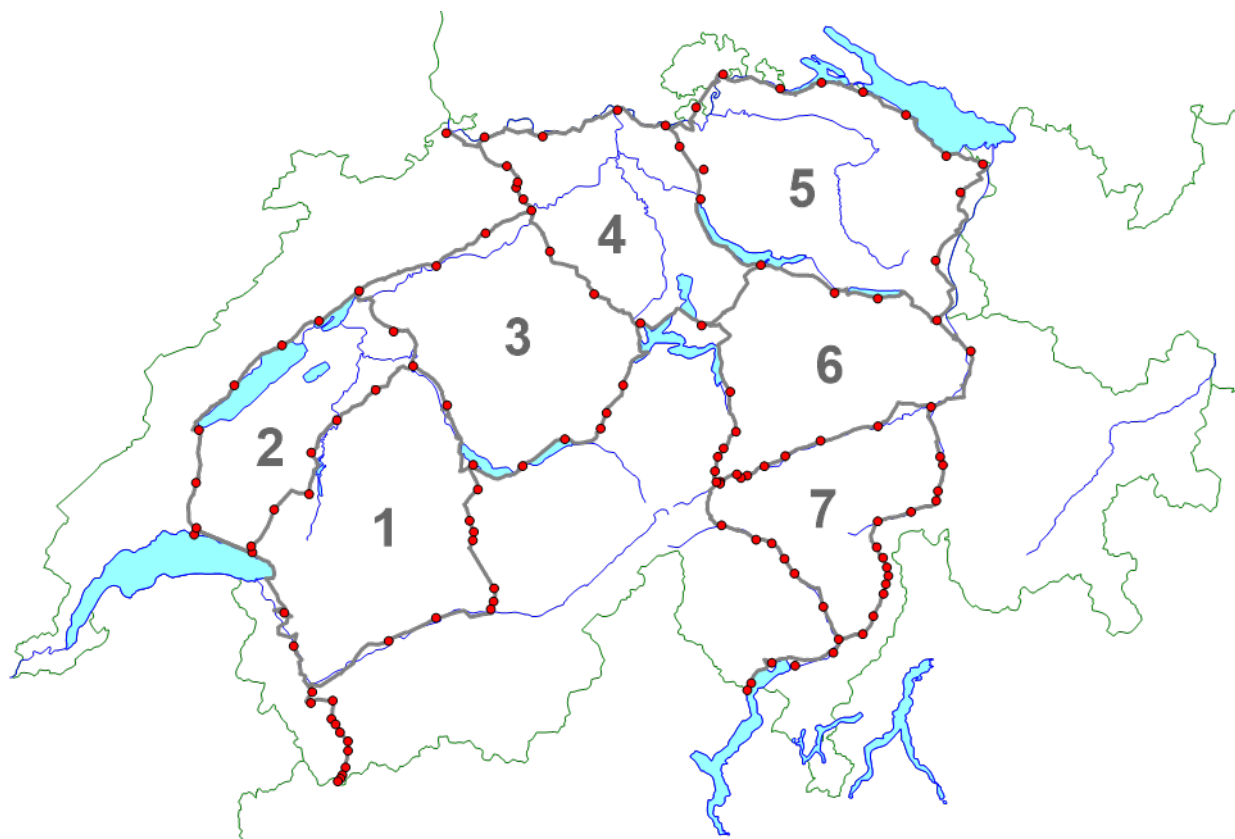


Abbildung 3-4: Punkte des Schweregrundnetzes SGN53 und Nummerierung der Polygone

3.3 Die Testschleife 1955

Für die vorgesehene Reduktion der Messungen des Landesnivellements und zur Berechnung von orthometrischen Höhen sollten in einer Testschleife des Landesnivellements möglichst dicht Schweremessungen durchgeführt werden. Diese Untersuchungen sollten dazu dienen, eine sinnvolle Dichte von Schweremessungen für die Korrektur des Landesnivellements zu wählen [Hunziker, 1959]. Ausgewählt wurde dazu das Polygon 17 des Landesnivellements (entspricht dem Polygon 7 des SGN53) mit den Hauptknotenpunkten in Reichenau, Castione und Andermatt. Der Höhenunterschied benachbarter Punkte sollte 36 m nicht übersteigen, und die Horizontalabstanz sollte nicht mehr als 1 km betragen. Da die Fixpunkte des Landesnivellements in der Regel weiter auseinanderliegen, musste auf vielen Hilfs- und Zwischenpunkten gemessen werden. Die Messung auf den insgesamt 549 Punkten erfolgte im Herbst 1955. 32 dieser Punkte fallen mit Punkten des SGN53 zusammen (Abbildung 3-5). 302 der gemessenen Punkte waren Zwischenpunkte des Landesnivellements (Nieten) oder temporäre Hilfspunkte, deren Lagekoordinaten nur grob bestimmt wurden. Alle übrigen Punkte (ca. 210) waren identisch mit Höhenfixpunkten des Landesnivellements (HFP1).

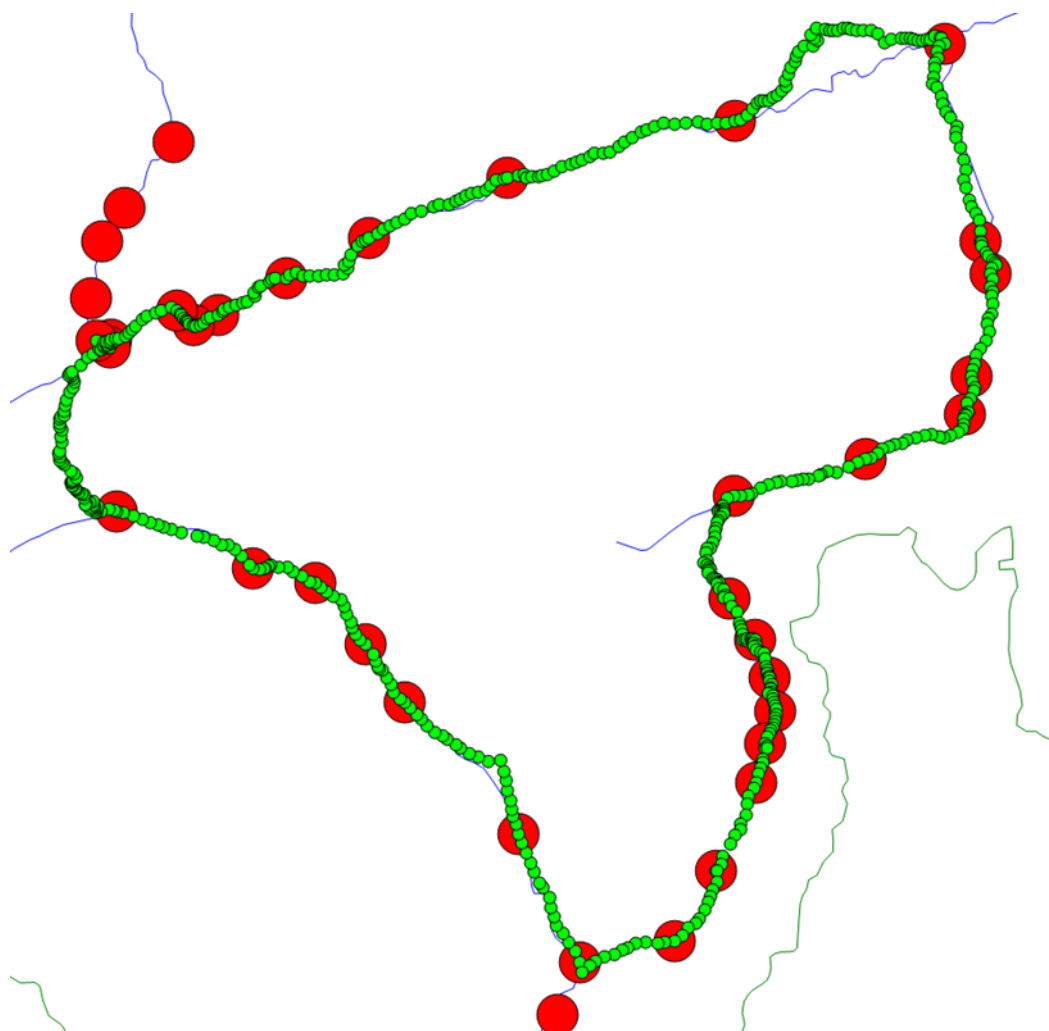


Abbildung 3-5: Punkte der Testschleife 1955 und Punkte des SGN53

3.4 Das REUN-Netz 1956

Im Mai 1955 wurde an einer Konferenz der Kommission für die Ausgleichung des Europäischen Nivellementnetzes (REUN, UELN) der IAG entschieden, dass jedes teilnehmende Land für seine Streckenabschnitte bis Ende 1956 geopotentielle Koten abliefern sollte. Für die Schweiz bedeutete dies, dass noch auf einigen Linien, die nicht im Grundnetz oder in der Testschleife enthalten waren, zusätzliche Schwere-messungen durchgeführt werden mussten [Hunziker, 1959]. Diese Arbeiten erfolgten unter Leitung der Schweizerischen Geodätischen Kommission in enger Zusammenarbeit mit der Landestopographie.

Zunächst wurde im Frühling 1956 ein Teil der Testschleife (die Linie Castione–Giornico–Airolo–Gotthardpass–Hospental) ausgewertet, um abzuklären, in welchen Abständen auf den REUN-Linien Schweremessungen erfolgen mussten, um die Vorgaben der IAG zu erfüllen (durch die Schwere-reduktion verursachter Fehler nicht grösser als 0.1 mGPU pro km). Dies führte zu einer Faustregel für die Messungen der REUN-Linien (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Kriterien für benachbarte Schwere-Punkte für das REUN-Netz

Art des Geländes	maximale Distanz	maximaler Höhenunterschied
flach	4–5 km	-
mittel	2 km	50 m
steil	1.5 km	100 m

Die Feldmessungen entlang der REUN-Linien erfolgten dann im Sommerhalbjahr 1956. Dabei wurden neben den neu zu messenden Linien auch auf den betroffenen Linien des SGN53 in grösserer Dichte noch zusätzliche Messungen ausgeführt. Das ergab total etwa 540 gemessene Punkte. Durch den Vergleich mit den Messungen auf den Punkten des SGN53 wurde die Genauigkeit des REUN-Netzes mit 0.05 mGal angegeben. Das Referenzsystem blieb – wie von der IAG gefordert – das Potsdamer System ($g[\text{Potsdam}] = 981274 \text{ mGal}$). Der weitaus grösste Teil der Punkte des REUN-Netzes fällt mit Fixpunkten des Landesnivellements zusammen. Nur 88 waren Zwischen- oder Hilfspunkte.

Anschliessend an die Feldmessungen und die Auswertung wurden von der Landestopografie auf den REUN-Linien geopotentielle Koten gerechnet und diese fristgerecht Ende 1956 an die IAG abgeliefert.

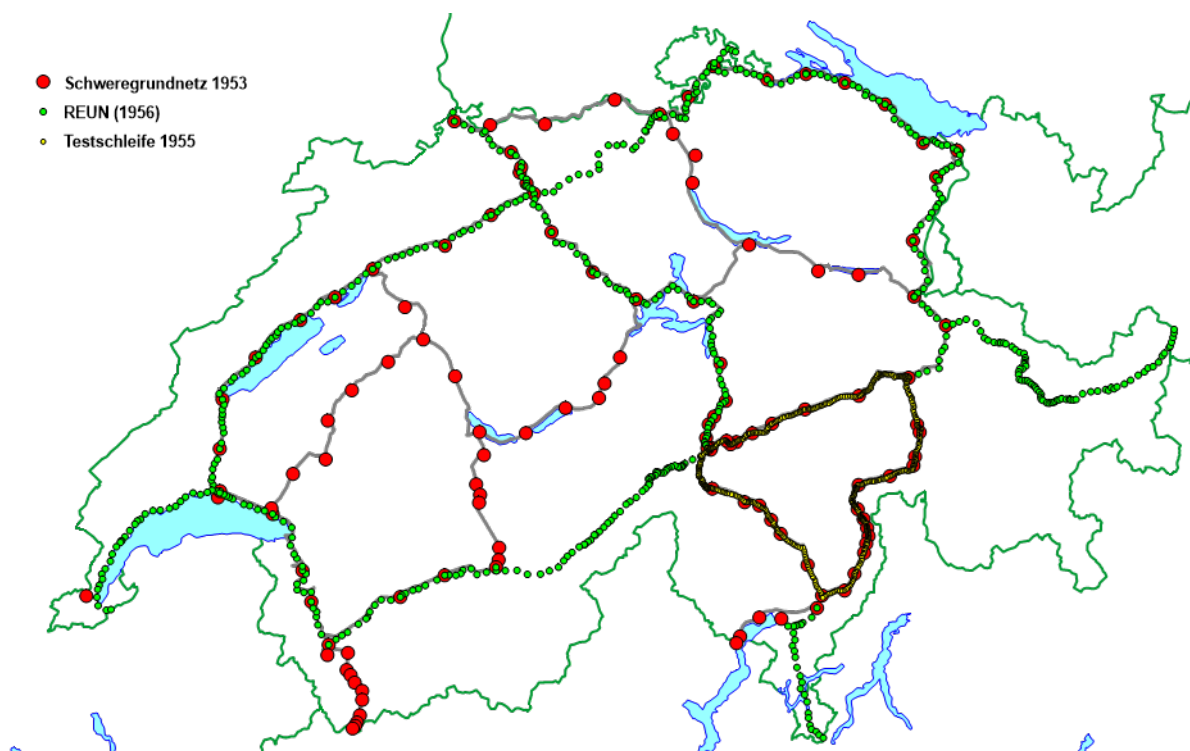


Abbildung 3-6: Schweremessungen für das REUN 1956

3.5 Das Schwerenetz 1. Ordnung 1960-1966

Die Punkte des SGN53 und des REUN liegen naturgemäss entlang der Linien des Landesnivellements. Insbesondere für die Bedürfnisse der Geophysik und der Geologie war es aber erwünscht, eine flächenmässig bessere Verteilung der Schwerepunkte zu haben. Deshalb hat die Schweizerische Geodätische Kommission 1960 einen Entwurf für eine Verdichtung des SGN53 unter dem Namen «Schweizerisches Schwerenetz erster Ordnung» präsentiert [Hunziker, 1960]. Für die neuen Punkte sollten folgende Kriterien gelten:

- pro 200 km² eine Schwerestation
- gleichmässige Stationsverteilung
- einfach anfahrbar
- bekannte Meereshöhe
- gute Versicherung

Der Netzentwurf enthielt 211 Punkte, wovon etwa die Hälfte mit Punkten des SGN53 oder des REUN zusammenfielen. Vorgesehen waren 107 Neupunkte, welche mit Punkten des eidgenössischen oder der kantonalen Nivellements identisch sein sollten. Zudem mussten wegen des eingeschränkten Messbereichs des Worden-Gravimeters (60-70 mGal bei höchsten Genauigkeitsanforderungen) auch eine relativ grosse Zahl von Zwischenpunkten eingeschaltet werden. Eine Neupublikation einer Karte der Schwereanomalien war mit dem Netz 1.Ordnung noch nicht vorgesehen. Dazu sollte dann das bereits 1962 angedachte aber nie realisierte Netz 2.Ordnung [Kobold 1962; Kapitel 5 von F. Gassmann] dienen, bei dem die Punkte nach geologischen Gesichtspunkten ausgewählt werden sollten.

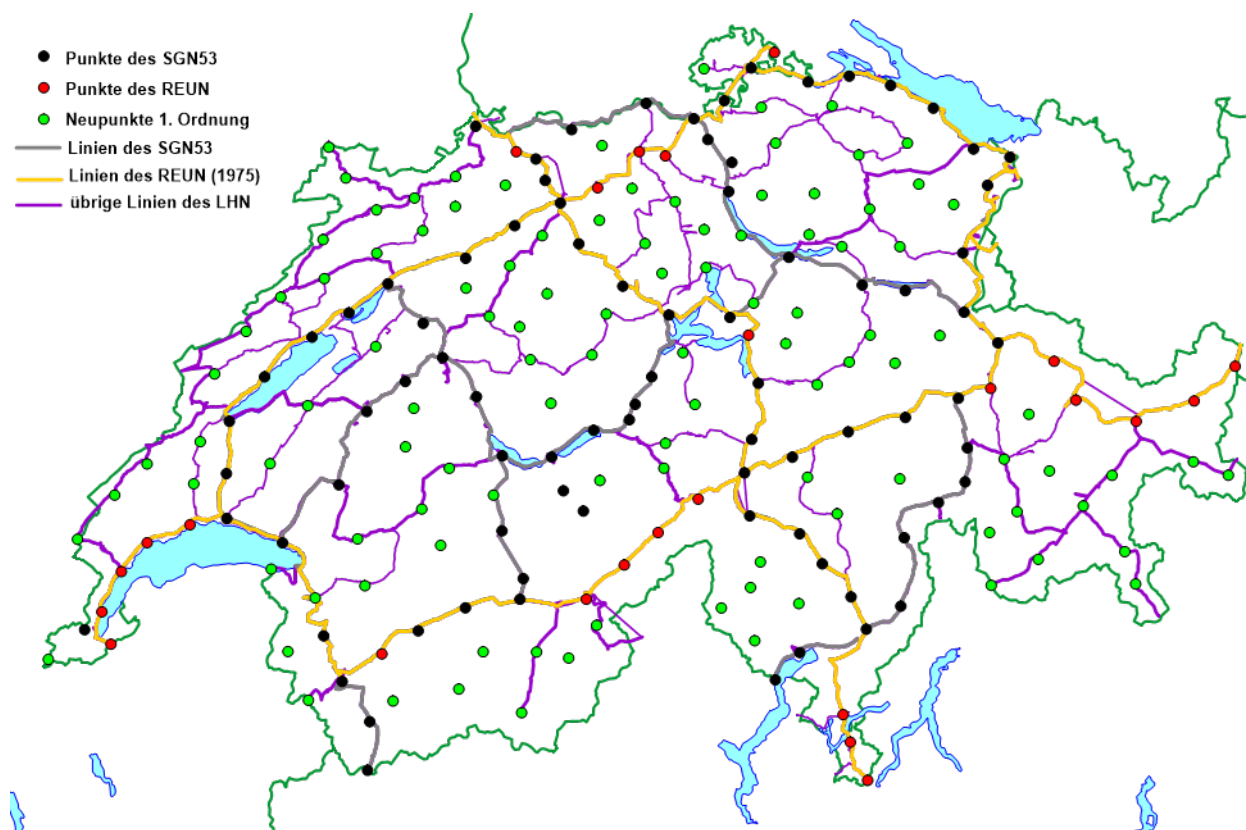


Abbildung 3-7: Entwurf des Schwerenetzes erster Ordnung 1960

Die Messungen für das Netz 1. Ordnung begannen im Sommer 1962 im östlichen Mittelland zwischen Zürichsee und Bodensee (Polygon 5 des SGN53). Bis Ende 1966 wurde dann das gesamte Netz erster Ordnung mit Ausnahme der südlichen Walliser Seitentäler beobachtet. Über diese Arbeiten und den Stand der Ausgleichung des Netzes wurde jährlich an den Sitzungen der SGK berichtet [Hunziker 1962, Fischer 1962, 1964, 1965, 1966, Chablais 1967]. Bei der Ausgleichung zeigten sich jedoch bei den Anschlüssen an die Punkte des SGN53 und des REUN unerwartet grosse Zwänge. Es wurde damals vermutet, dass diese Probleme durch Temperaturabhängigkeiten und Sprünge des Ablesesystems des verwendeten Worden-Gravimeters verursacht wurden. Deshalb wurden die Resultate des Netzes erster Ordnung nie offiziell publiziert und es wurde entschieden, unabhängige Kontrollmessungen durchzuführen. Dies führte zur Messung des Kontrollnetzes von 1968 [Fischer, 1969].

3.6 Das Kontrollnetz 1968 (SKN68)

Aufgrund der grossen aufgedeckten Zwänge bei der Ausgleichung des Netzes erster Ordnung wurde 1968 ein unabhängiges Kontrollnetz (SKN68) konzipiert. Die Unabhängigkeit wurde dadurch erreicht, dass drei der neu aufgekommenen LaCoste&Romberg-Gravimeter (LCR) in Schweden und den USA für eine kurze Zeit gemietet werden konnten. Im Kontrollnetz sollten alle Knotenpunkte des SGN53 und des REUN sowie einige wichtige Punkte mit Problemen im Netz erster Ordnung oder mit extremen Schwerewerten enthalten sein. Zudem sollten alle Netzteile des Netzes 1. Ordnung gut abgedeckt werden. Ein Nebeneffekt der Möglichkeit, mit dem LCR-Gravimeter zu messen, war auch, dass es nun erstmals möglich war, relativ einfach grosse Schweredifferenzen ohne Zwischenpunkte zu beobachten. Davon wurde Gebrauch gemacht, und es wurden einige einfach zugängliche Berggipfel in das Netz einbezogen (Monte Generoso, Säntis, Weissfluhjoch).

Der Netzentwurf umfasste die Messung von ca. 100 gleichmässig über die Schweiz verteilten Punkten. Eine Ausnahme bildeten lediglich die südlichen Walliser Seitentäler, welche im Netz 1. Ordnung noch nicht beobachtet worden waren. Dies sollte im Kontrollnetz nachgeholt werden. Die ersten Messungen erfolgten im Mai und Juni 1968 mit dem LCR Nr. 54 der Universität Uppsala. Im Juli stand dann das LCR Nr. 115 des US Map Service zur Verfügung und bis im April 1969 das LCR Nr. 24 (ebenfalls US Map Service). Insgesamt wurden schliesslich 85 Punkte gemessen (Abbildung 3-8). 19 davon waren Neupunkte. Neben

den schon erwähnten Punkten im Wallis und den drei Berggipfeln waren dies Ersatzpunkte für zerstörte Punkte sowie der Repère Pierre du Niton in Genf.

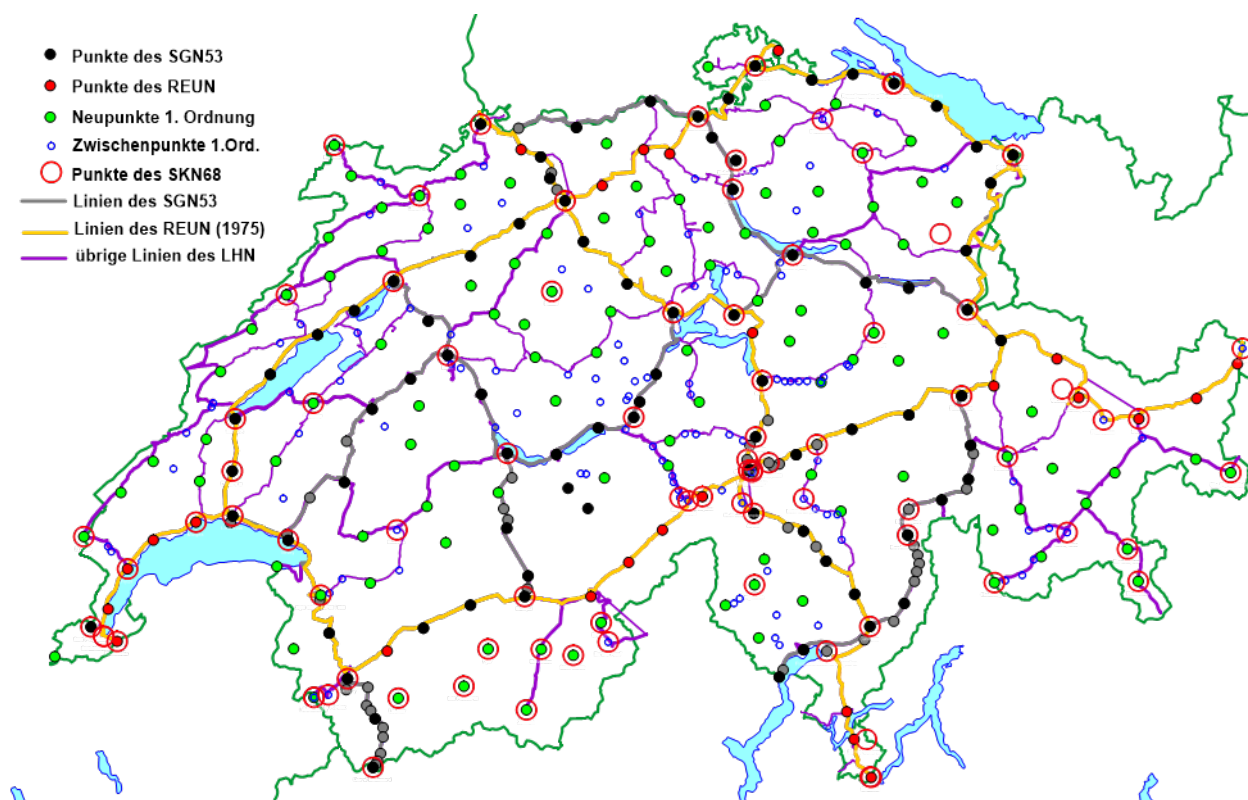


Abbildung 3-8: Die Punkte des SKN68 (rote Kreise)

Eine Ausgleichung des Kontrollnetzes wurde im Mai 1970 an der Sitzung der SGK präsentiert [Fischer, 1970]. Das Netz wurde auf der Fundamentalstation in Zürich gelagert, welche einen neuen Schwerewert erhielt. Dieser ergab sich durch die von der IAG 1967 vorgeschlagene Anpassung des Schwerewertes von Potsdam um -14 mGal. 1969 wurde die Station in Zürich auch an die Absolutstation in Sèvres (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) und an fünf Punkte am Amt für Mass und Gewicht (heute METAS) in Wabern angeschlossen. Dies ergab einen um etwa 15 mGal tieferen Wert als der bisher verwendete. Für die Lagerung wurde für das SKN68 schliesslich der neue Wert von $g=980'652$ mGal in Zürich verwendet. Die Gesamtausgleichung des SKN68 (inklusive der Anschlussmessungen an Sèvres und ans METAS 1969) ergab eine Genauigkeit aller Punkte in der Grössenordnung von 0.02 mGal und zeigte Unterschiede von bis zu 0.5 mGal gegenüber den mit Worden-Gravimetern bestimmten Werten des Netzes erster Ordnung. Die 1970 publizierten Schwerkten des SKN68 [Fischer, 1970] beziehen sich auf den Gravimeterstandort und nicht auf die Fixpunkte.

3.7 Das Kontrollnetz EKN76 und die Schwerekarte 1980

In den 1970er Jahren startete die neu gegründete (1971) Schweizerische Geophysikalische Kommission (SGPK) ein Projekt unter dem Namen «Die neue Schwerekarte der Schweiz», welches zum Ziel hatte, eine neue Karte der Schwereanomalien zu publizieren und die bisherige von Niethammer (1921) abzulösen. Dazu sollten umfangreiche Schweremessungen durchgeführt werden mit dem Ziel, eine Stationsdichte von 1 Punkt pro 30 km^2 zu erreichen (ca. 2000 Punkte). Als Anschlusspunkte sollten die bestehenden Punkte des SGN53, des REUN und des SKN68 verwendet werden. Die Genauigkeit des Netzes erster Ordnung wurde als zu gering erachtet [Klingelé und Olivier 1980]. Um die Qualität dieser Punkte zu überprüfen, wurde 1976 mit 2 LCR-Gravimetern ein grobmaschiges Netz von 14 Punkten (Abbildung 3-9) unter dem Namen EKN76¹ gemessen. 8 dieser Punkte waren bereits im SKN68 enthalten, 4 weitere im SGN53. Der neue Punkt Bottighofen ersetzte den zerstörten Punkt in Kreuzlingen. Und schliesslich wurde an der ETH

¹ Eine offizielle Erklärung des Kürzels «EKN» wurde nie publiziert. Man kann es wahlweise als «Ergänzendes Kontrollnetz» oder als «Emile Klingelé Netz» deuten.

Hönggerberg (Gebäude HPT) ein provisorischer Ersatz für die mittlerweile zerstörte Fundamentalstation in Zürich (ETH Hauptgebäude) errichtet. Aus dem Vergleich der Resultate von EKN76 mit den älteren Netzen wurden 2 Polynome 4. Grades (SGN53 minus EKN76 und SKN68 minus EKN76) bestimmt, um die Differenzen der Netze zu modellieren [Klingelé und Olivier 1980]. Diese modellierten Differenzen liegen im grössten Teil der Schweiz unter 0.1 mGal, an einigen Randzonen unter 0.2 mGal und im Extremfall (Münstertal) bei 0.35 mGal. Auf 13 weiteren im System des EKN76 bekannten Punkten konnte die Qualität der Polynomtransformation überprüft werden. Die sich aus den Polynomen ergebenden Korrekturwerte wurden an den Schwerewerten des SGN53 und des SKN68 angebracht und so als Stützwerte für die Messungen für die Schwerekarte 1980 verwendet. Die im EKN76 publizierten Schweren – und auch alle daraus abgeleiteten Werte für die Schwerekarte 1980 – beziehen sich noch auf das alte Potsdamer Datum und auf die internationale Schwereformel von 1930. Als Schwerewert am alten Fundamentalpunkt Zürich wird im Bericht [Klingelé und Olivier 1980] 980'672 mGal angegeben. Auf der gedruckten Karte ist jedoch der wahrscheinlich tatsächlich verwendete Wert von 980'667 mGal aufgeführt.

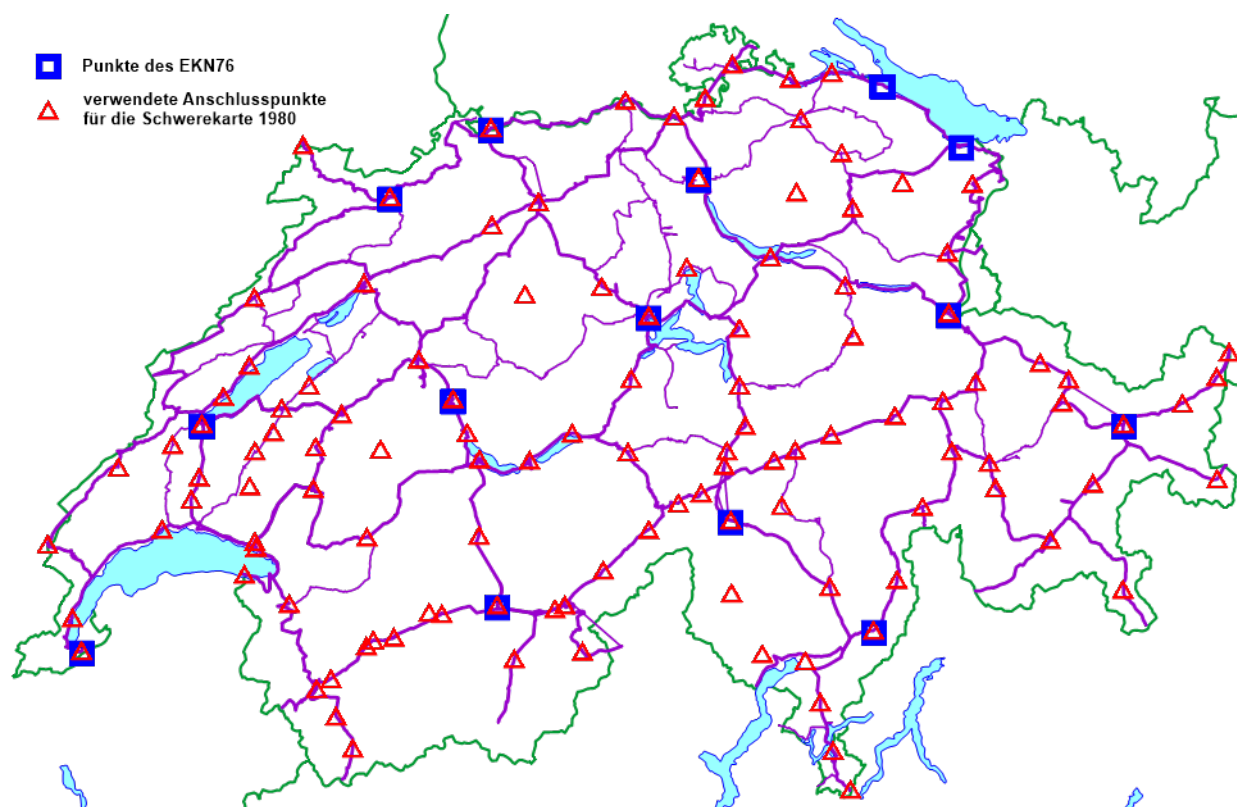


Abbildung 3-9: Punkte des EKN76 und verwendete Anschlusspunkte für die Schwerekarte 1980

Insgesamt wurden für die Schwerekarte 1980 von der Uni Lausanne und der ETH Zürich 2014 Punkte in den Jahren 1973–1979 gemessen (Abbildung 3-10). Für die Publikation der Karte der Bouguer-Anomalien (Abbildung 3-11) wurde der Datensatz noch um Schweredaten aus dem Ausland ergänzt.



Abbildung 3-10: Messungen für die Schwerekarte 1980

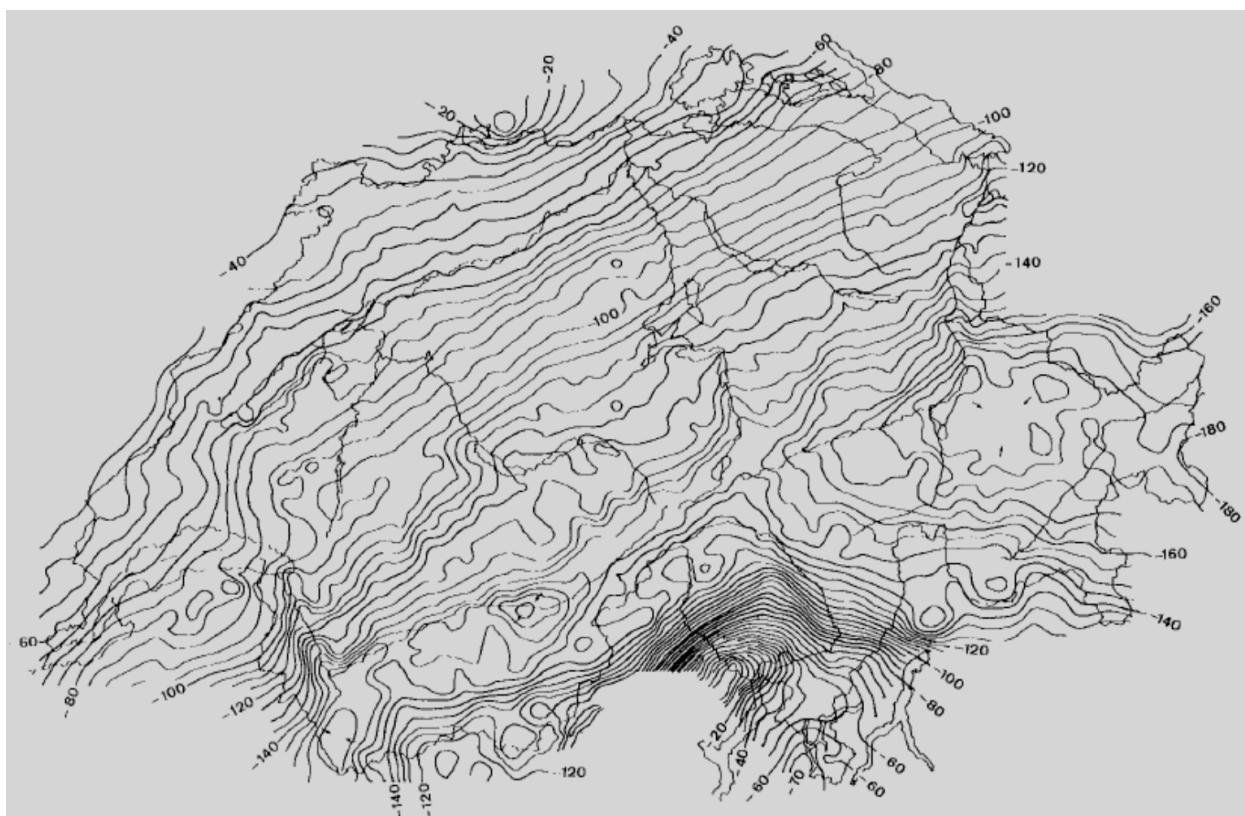


Abbildung 3-11: Bouguer-Anomalien (in mGal) aus der Schwerekarte 1980 [Klingelé und Olivier, 1980]

3.8 Das Schweregrundnetz 1983 (SNGN83)

Zwischen 1878 und 1980 erfolgten die ersten modernen absoluten Schweremessungen in der Schweiz [Kahle et al. 1981]. Dabei wurde auf sieben Stationen (Zürich, Chur, Interlaken, Jungfrauoch, Brig, Bözberg, Guspisbach) mit dem Gerät des italienischen nationalen Metrologie-Instituts IMGC (heute INRiM, Turin) beobachtet. Diese Messungen bildeten eine neue Grundlage für die Lagerung und Ausgleichung des nationalen Schwerenetzes. Um die Absolutmessungen aber sinnvoll in die Gesamtausgleichung einführen zu können, mussten diese noch durch Relativmessungen mit den bestehenden Punkten verbunden werden. Dazu wurde in den Jahren 1979–1981 das sogenannte «Verbindungsnetz» gemessen. Dieses hatte drei Ziele:

- die Verbindung der Absolutstationen und deren Exzentren untereinander durch Relativmessungen;
- die Verbindung der Absolutstationen an die bestehenden Punkte des SKN68;
- eine bessere Verknüpfung des SKN68 mit dem EKN76.

Das Hauptnetz des Verbindungsnetzes enthielt die Absolutpunkte in Brig, Interlaken, Zürich und Chur, deren Exzentren sowie die Station Göschenen des SGN53. Die Absolutstation Jungfrauoch wurde über die 1980 gemessene Eichstrecke Interlaken–Jungfrauoch (s. [Klingelé und Kahle, 1981] sowie [Fischer, 1981]) angeschlossen und die beiden Stationen im Gotthard-Strassentunnel (Guspisbach, Bözberg) über den Punkt Göschenen (und Airolo). Die Verbindung der Absolutstationen und der Punkte des EKN76 erfolgte über den Anschluss an 1 bis 2 benachbarte Punkte des SKN68.

Unter dem Namen «Nationales Schwerenet der Schweiz» (Swiss National Gravity Net, SNGN) sollte danach eine Gesamtausgleichung aller bisherigen Schweremessungen im Grundnetz erfolgen. Diese Arbeit sollte in zwei Schritten erfolgen: In einem ersten Schritt sollten nur die Messungen mit LCR-Gravimetern seit 1968 und die Absolutmessungen betrachtet werden. Die Integration der viel ungenaueren und problematischeren älteren Messungen mit den Worden-Gravimetern bis 1966 sollte erst danach erfolgen.

In [Fischer, 1983] wurden die Resultate des ersten Teiles publiziert. Dieser umfasste die Absolutmessungen 1978–1980, die Relativmessungen des SKN68 (ohne den Anschluss an Sèvres und ans METAS 1969), das EKN76 und das Verbindungsnetz 1979–1981 (ohne die Eichstrecke Jungfrauoch). Die publizierte Liste von Schwerepunkten umfasst 112 Stationen. Das Schweredatum wurde in diesem Netz durch die Absolutmessungen festgelegt, welche als Festpunkte in die Ausgleichung eingeflossen sind. Der Wert der Absolutstation in Zürich ($g=980'647.895$ mGal) wurde später auch als Referenzwert für den Gravimetrischen Atlas 1:100'000 [Olivier et al., 2010] angegeben. Für den Schwerewert auf der inzwischen nicht mehr brauchbaren Fundamentalstation in Zürich wurde ein Wert von $980'651.916$ mGal berechnet (bisher auf $980'652.0$ mGal fixiert). Die Genauigkeit der berechneten Schwerewerte war mit 0.01 bis 0.03 mGal ausserordentlich gut, obwohl insbesondere auf den Absolutstationen teilweise grössere Zwänge auftraten.

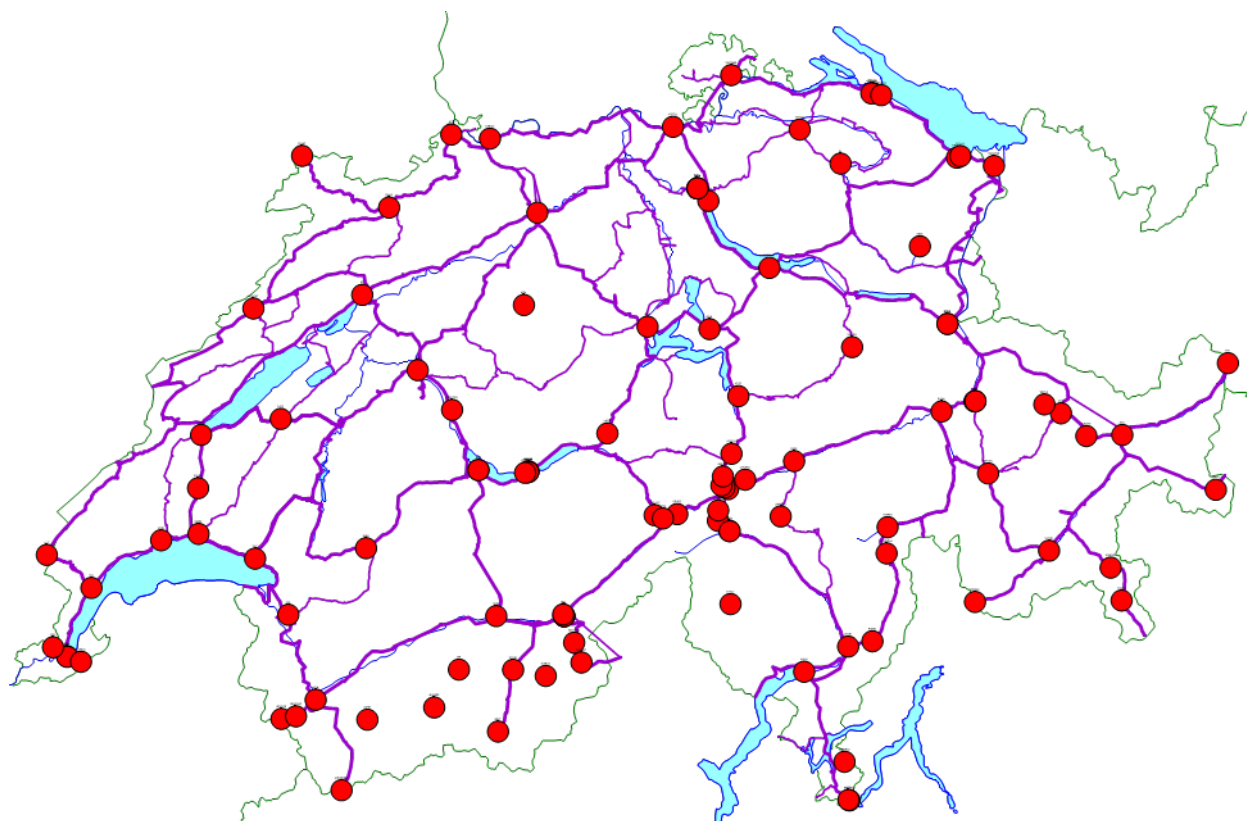


Abbildung 3-12: Publizierte Punkte des SNGN83 [Fischer, 1983]

Der ursprünglich geplante zweite Teil des SNGN, also die Auswertung der mit den Worden-Gravimetern bis 1966 durchgeführten Messungen, erfolgte nie abschliessend und wurde somit auch nie publiziert. Deshalb sind insbesondere die Punkte und Messungen erster Ordnung der Jahre 1962–1966 heute nicht mehr leicht rekonstruierbar, sofern sie nicht in späteren Arbeiten (Landesnivellement, gravimetrische Landesaufnahme) als Anschlusspunkte verwendet wurden.

3.9 Aerogravimetrie

Obwohl die fluggravimetrischen Projekte nichts mit dem Schweregrundnetz zu tun haben, seien die in der Schweiz durchgeführten Arbeiten der Vollständigkeit halber hier doch noch kurz zusammengefasst.

Die Aerogravimetrie erreicht natürlich niemals die Genauigkeit der terrestrischen Messungen. Eine Genauigkeit von besser als 1 mGal ist auch heute noch kaum zu erreichen. Dennoch hat sie einige Vorteile: So können in kurzer Zeit und relativ kostengünstig grosse Gebiete vermessen werden, was deren Einsatz vor allem in schwierig zugänglichen Regionen (z.B. in den Hochalpen) interessant macht. Zudem decken die aerogravimetrischen Messungen einen Höhen-Spektralbereich ab, welcher zwischen den globalen Satellitendaten und den hochauflösenden terrestrischen Daten liegt.

Eine erste gravimetrische Befliegung der ganzen Schweiz fand im November/Dezember 1992 statt [Klingelé et al. 1996]. Organisiert wurde diese durch die ETH Zürich in Zusammenarbeit mit LaCoste&Romberg. Dabei wurde die Twinotter der Eidgenössischen Vermessungsdirektion (heute swisstopo) verwendet. Das Gravimeter war ein LCR «Model S Marine Gravity Meter», welches auf einer stabilisierten Plattform installiert wurde. Für die exakte Positionierung wurden zwei GPS-Empfänger am Flugzeug montiert. Insgesamt wurden 8 Flüge mit insgesamt 24 Linien auf einer Flughöhe von 5200 Metern durchgeführt (Abbildung 3-13). Wegen Einschränkungen im Flugbetrieb und der damals noch unvollständigen GPS-Konstellation musste nachts geflogen werden.

Aus den aerogravimetrischen Daten wurde eine Karte der Bouguer-Anomalien erstellt (Abbildung 3-13). Wegen des hohen Messrauschens spielt dabei die Wahl einer geeigneten Filtermethode eine zentrale Rolle.

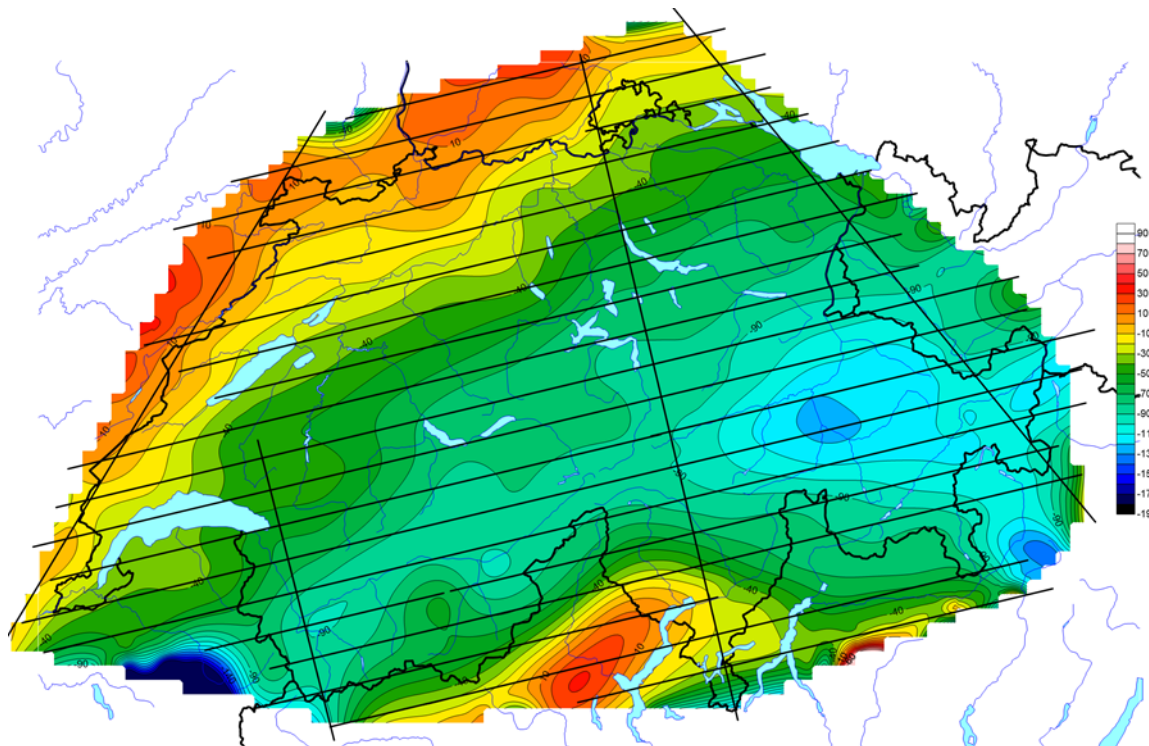


Abbildung 3-13: Aerogravimetrische Vermessung 1992

Eine zweite gravimetrische Befliegung, welche teilweise das Gebiet der Schweiz abdeckte, wurde im November 1998 durchgeführt [Verdun et al., 2003]. Das Zielgebiet dieser Befliegung waren die französischen Alpen. Verwendet wurde hier mehr oder weniger dasselbe Instrumentarium wie 1992, allerdings wurden nun fünf GPS-Empfänger auf der Twinotter installiert.

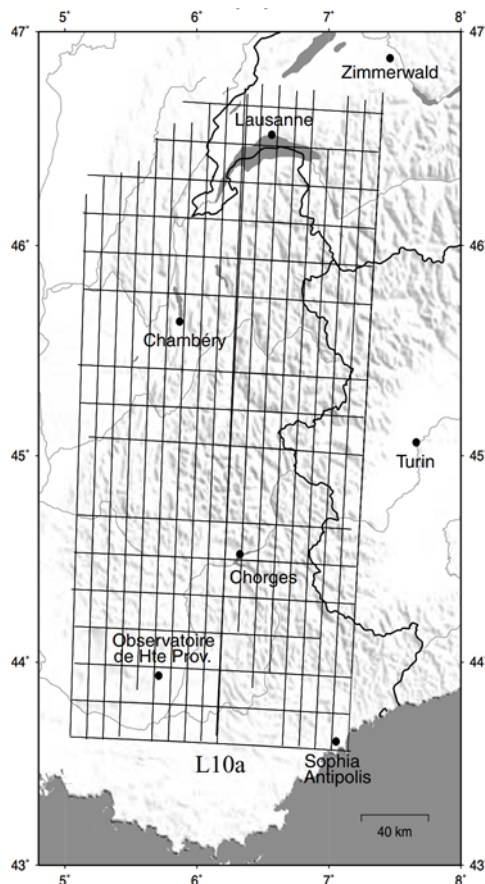


Abbildung 3-14: Aerogravimetrische Befliegung der französischen Alpen 1998 (aus [Verdun et al. 2003])

3.10 Das Schweregrundnetz 1995 (SG95)

1991 wurde von der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission, der Schweizerischen Geodätischen Kommission und der Landestopografie entschieden, das Schweregrundnetz völlig neu zu konzipieren und ziemlich unabhängig von den bisherigen Arbeiten neu aufzubauen. Als Grundgerüst des neuen Schweregrundnetzes (SG95, [Arnet und Klingelé, 1997]) sollten neue Absolutmessungen auf fünf Punkten dienen. Als Relativpunkte sollten in erster Linie die damals neu erstellten Hauptpunkte des GPS-Netzes LV95 dienen. Nur noch wenige Punkte des SG95 waren gleichzeitig Punkte des Landesnivellements und stellten somit nur noch eine minimale Verbindung zu den älteren Schwerenetzen her.

Die Wahl der LV95-Punkte als Stationen des Schwerenetzes hatte einige Vorteile. So sind diese in der Regel sehr stabil versichert und gut dokumentiert. Sie sind meistens leicht anfahrbar, sind regelmässig über das ganze Land verteilt und sollten auch über lange Zeit erhalten bleiben. Allerdings haben die LV95-Punkte auch einige Nachteile für die Gravimetrie, denn sie waren ursprünglich gar nicht für diese Art von Messungen vorgesehen. So sind einige von ihnen nur sehr schwierig stationierbar. Viele Punkte befinden sich in Schächten, was ebenfalls die Stationierbarkeit beeinträchtigt. Andere Punkte liegen auf oder in unmittelbarer Nähe von Wasserreservoiren, was die Konstanz des Schwerewertes stören könnte. Bei weiteren LV95-Punkten mussten wegen der nötigen GPS-Sichtbarkeit Kompromisse bei der Begehbarkeit und dem Anfahrtsweg eingegangen werden.

Als Absolutstationen wurden die beiden bereits 1978 gemessenen Punkte in Zürich und Chur verwendet. Neue Punkte wurden in Pratteln, Lausanne und auf dem Monte Ceneri errichtet. Die Absolutmessungen auf diesen 5 Punkten erfolgten im Juni 1994 durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV, Wien) mit dessen Freifall-Gravimeter JILAg-6. Die Absolutstationen wurden durch die Landestopografie ans Landesnivellement angeschlossen (mit Ausnahme der Station Zürich, welche nur ans städtische Nivellement angeschlossen ist). SG95 wurde auch mit fünf Absolutstationen des benachbarten Auslandes (2 in Deutschland, 2 in Österreich, 1 in Italien) verbunden. Die beiden Absolutstationen von 1979 in Brig und Interlaken sind zwar im SG95 auch enthalten, wurden aber nur über Relativmessungen angeschlossen. Die drei übrigen Absolutstationen von 1979–1980 (Jungfrauoch, Bänzberg, Guspisbach) sind nicht Bestandteil von SG95.

Die Relativmessungen erfolgten zwischen 1992 und 1995 durch die ETH Zürich. Dabei wurde normalerweise gleichzeitig mit drei LCR-Gravimetern (G317, G514 und G839) gemessen. Jede Station wurde mindestens an zwei Tagen gemessen und möglichst mit allen benachbarten Punkten direkt verbunden. Die täglichen Messungen wurden, falls möglich, auf absoluten Schwerepunkten begonnen und abgeschlossen. Durch die Verwendung von gleichzeitig 2–3 Gravimetern konnten Sprünge gut detektiert und die Drifts zuverlässig bestimmt werden.

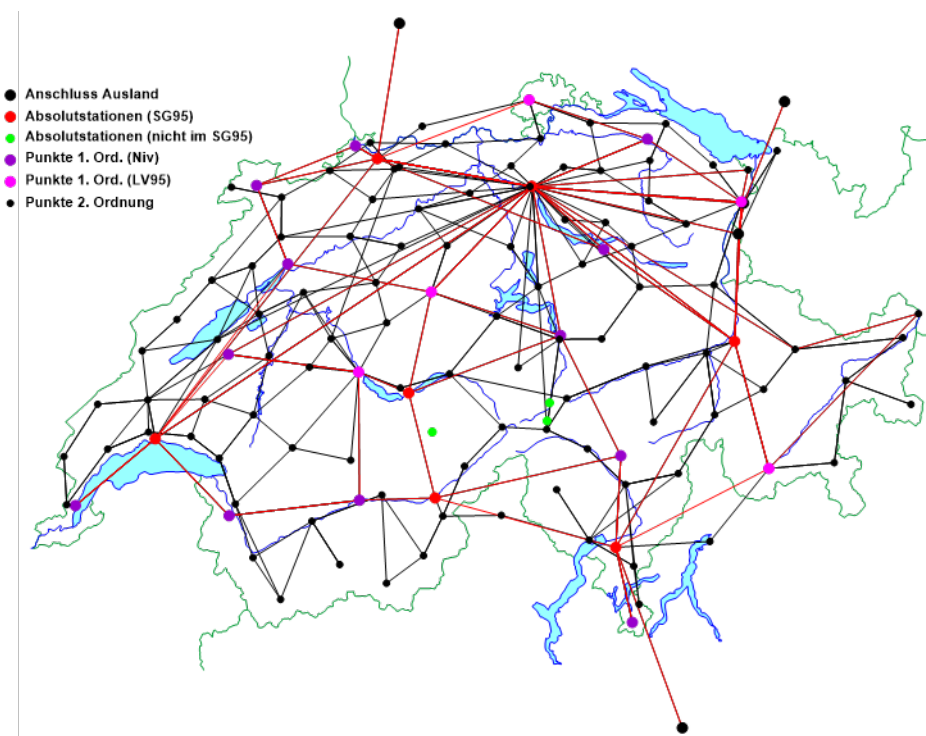


Abbildung 3-15: Punkte und Messlinien des SG95

SG95 wurde hierarchisch aufgebaut. Das Netz 0. Ordnung wird durch die Absolutstationen und deren Exzentren gebildet. Das Netz 1. Ordnung umfasst fünf sehr gut stationierbare LV95-Punkte und 12 Höhenfixpunkte, auf welchen das Gravimeter meist direkt, ohne Stativ, positioniert werden konnte. Der Sinn dieses Netzes 1. Ordnung war einerseits die Verbindung zu den alten Netzen, aber auch die Errichtung von gut stationierbaren Punkten in Gegenden, wo die LV95-Punkte eher schwierig zu besetzen sind. Das Netz 2. Ordnung wird schliesslich durch alle übrigen LV95-Hauptpunkte (mit Ausnahme von Jungfraujoch, Piton und Hohentwiel) gebildet. Hinzu kommen noch zwei Höhenfixpunkte in Vinadi und St. Margrethen. Diese wurden als Verbindung zum österreichischen Schwerenet in SG95 integriert.

Bei der Ausgleichung des SG95 spielte diese Hierarchie allerdings keine grosse Rolle mehr, da alle Messungen gemeinsam ausgeglichen wurden. Auch die Absolutmessungen wurden nicht als fest, sondern mit ihren jeweiligen Standardabweichungen in die Ausgleichung eingeführt. Die ausgewiesene Genauigkeit der Punkte (besser als 0.01 mGal auf den Absolutpunkten, zwischen 0.01 und 0.03 mGal auf den Relativpunkten) hing in erster Linie von der Anzahl der durchgeführten Messungen ab.

3.11 Der gravimetrische Atlas 1:100'000

Schon bald nach dem Abschluss der Arbeiten zur Schwerekarte 1980 [Klingelé und Olivier 1980], startete die Schweizerische Geophysikalische Kommission (SGPK) ein neues Projekt unter dem Namen «Gravimetrischer Atlas der Schweiz». Dieses Projekt lief unter der Leitung von R. Olivier (Uni Lausanne) und hatte zum Ziel, Karten der Bouguer-Anomalien im Massstab 1:100'000 zu publizieren. Die angestrebte Punktdichte war dabei ca. 1 Punkt pro km² [Olivier et al., 2010]. Die Messungen für dieses umfangreiche Projekt mit 85 Feldkampagnen erfolgten in den Jahren 1986–2000. Neben diesen Neumessungen wurden aber auch viele ältere Messungen neu aufbereitet und ausgewertet (z.B. Schwerekarte 1980, die Arbeiten in der Westschweiz [Klingelé, 1972], in Genf [Poldini, 1963], im Rhonetal [Gonet, 1965] und [Wagner, 1970], in der Nordschweiz [Klingelé und Schwendener, 1984] und viele weitere). Dies ergab schliesslich einen Datensatz von ca. 30'000 Punkten (Abbildung 3-17), welche verwendet werden konnte. Die angestrebte Punktdichte konnte also insbesondere im Alpenraum nicht ganz eingehalten werden. Die Publikation der Karten erfolgte in 4 Etappen in den Jahren 1994, 1998, 2000 und 2002. Als Ergänzung wurde 2008 auch eine neue Karte der Bouguer-Anomalien im Massstab 1:500'000 erstellt (Abbildung 3-18).

Als Anschlusspunkte (Abbildung 3-16) für die Messungen für den gravimetrischen Atlas dienten in erster Linie Punkte des SGN53 und des REUN (1956) mit ihren ursprünglich publizierten Schwerewerten aus [Hunziker, 1959], also ohne die für die Schwerekarte 1980 berechneten Korrekturpolynome. Einige Anschlusspunkte stammen aus dem SNGN83 oder aus provisorischen Auswertungen des Netzes 1. Ordnung von Fischer. Um die Anfahrtswege zu verkürzen, wurden in manchen Gebieten auch temporäre lokale Referenzstationen eingerichtet. Für die spätesten Kampagnen konnten auch schon Punkte des SG95 verwendet werden. Diejenigen Kampagnen, welche noch im Potsdamer System vorlagen, wurden durch Subtraktion von 15 mGal auf das aktuelle Schweredatum transformiert. Als Schweredatum der gedruckten Karten wird 980'647.895 mGal für die Absolutstation in Zürich (Hönggerberg) angegeben. Dies entspricht dem Resultat der Absolutmessung von 1978.

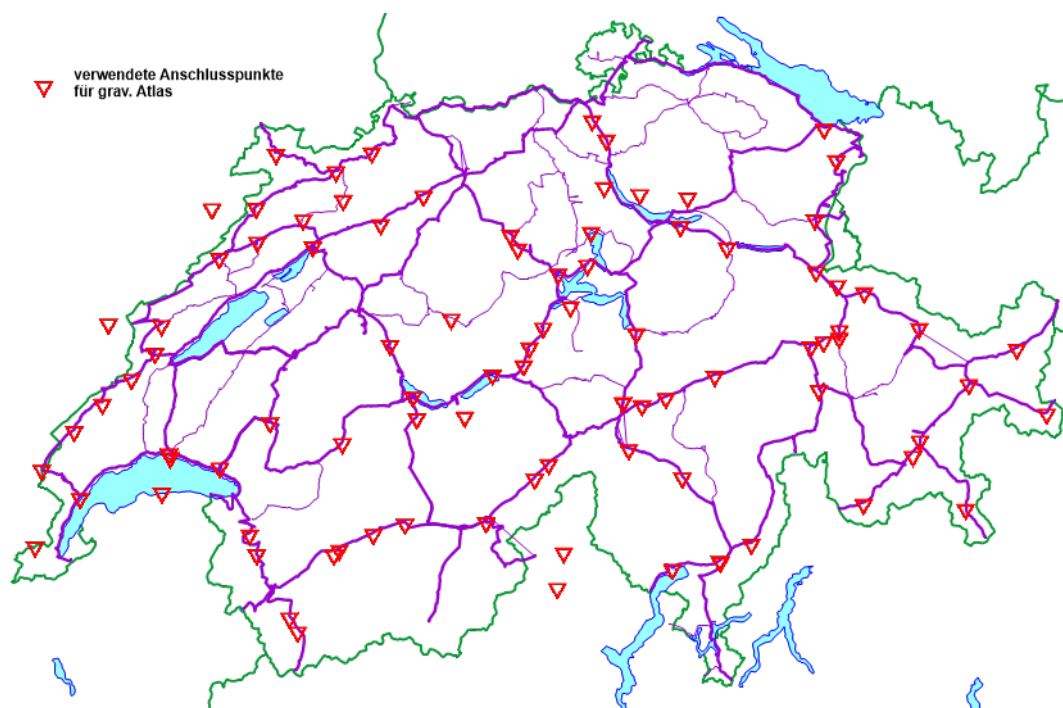


Abbildung 3-16: Anschlusspunkte für den gravimetrischen Atlas

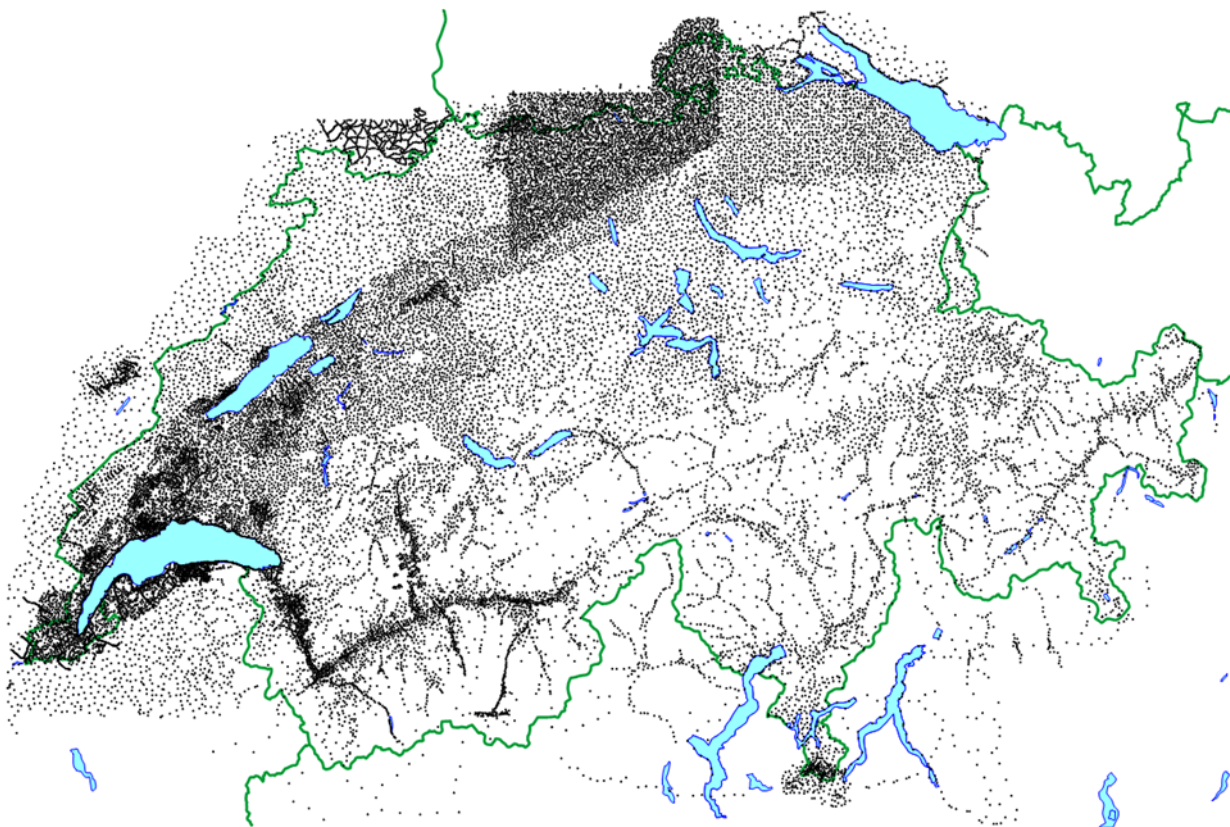


Abbildung 3-17: Datensatz für den gravimetrischen Atlas (SGPK, 1994–2008)

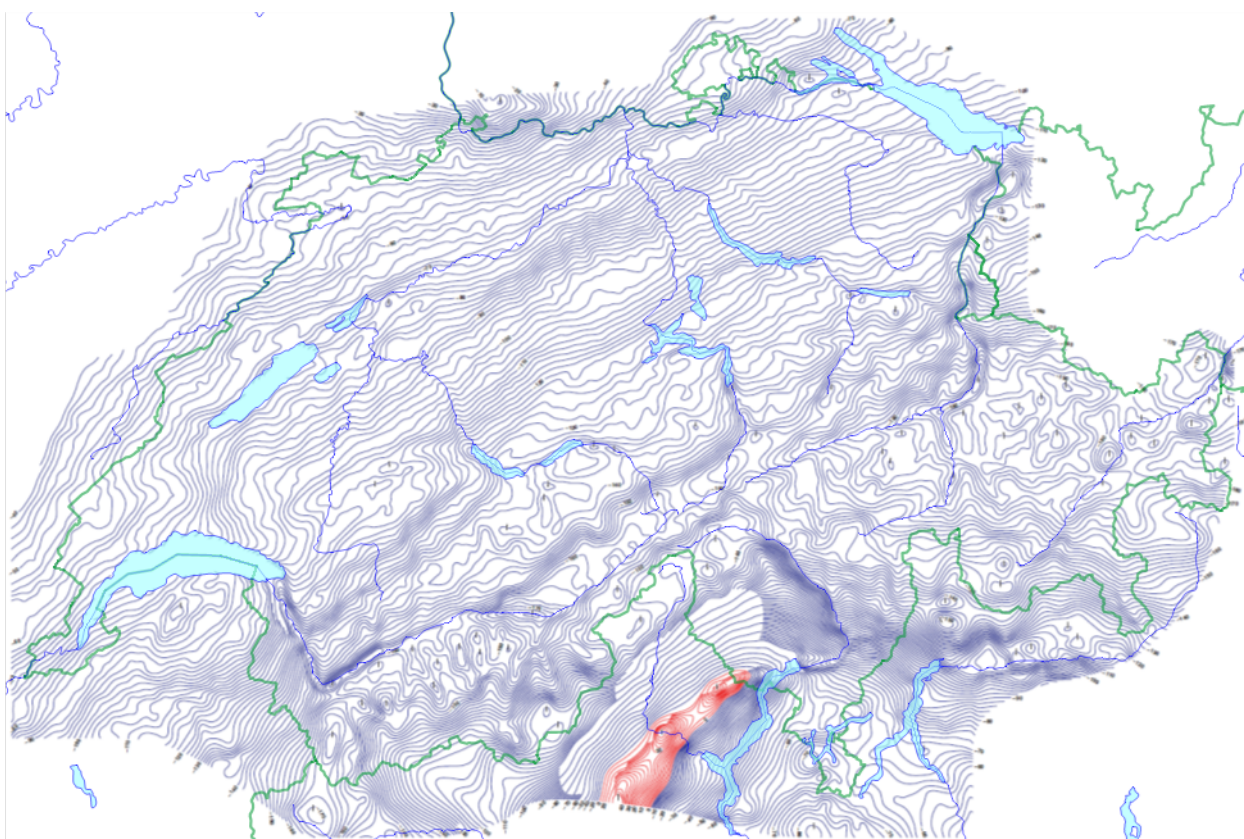


Abbildung 3-18: Bouguer-Anomalien aus der Schwerekarte 1:500'000 (SGPK, 2008)

3.12 Die Schweremessungen für das Landesnivellement

Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts war geplant, das eidgenössische Nivellement um den Einfluss der Schwere zu korrigieren und ein orthometrisches Höhensystem einzuführen. Dies war neben den Bedürfnissen der Geologie und der Geophysik einer der Hauptgründe für die umfangreichen Pendelmessungen von Niethammer. Erste praktische Anwendungen und Untersuchungen wurden von Hilfiker und Niethammer am Nivellement des Simplonpasses durchgeführt [SGK, 1910]. Der Rechenaufwand für die Interpolation und Reduktion der Schweren sowie für deren Berücksichtigung im Landesnivellement war natürlich zu dieser Zeit enorm gross. Zudem zogen sich die Diskussionen über die anzuwendende Methode und die Wahl des Höhensystems über Jahrzehnte hin. Eine erste Gesamtausgleichung des Landesnivellements unter Berücksichtigung von gemessenen Schweren erfolgte durch Schürer (1944). Verwendet hat er dazu in erster Linie die Pendelmessungen von Niethammer bis 1918. Diese Arbeiten haben jedoch nie zur Einführung eines neuen Höhensystems in der Schweiz geführt und die unkorrigierten Höhen blieben als offizielles System erhalten. Eine übersichtliche Darstellung und detaillierte Zusammenstellung dieser historischen Arbeiten ist in [Schlatter, 2007, Kap. 5.4] gegeben.

Trotz des negativen Entscheids über die Modernisierung des nationalen Höhensystems war die SGK der Meinung, dass die Untersuchungen für die Berechnung strenger orthometrischer Höhen weitergeführt werden sollten. Das Bedürfnis war hauptsächlich die Verbindung mit den Nivellementsnetzen des Auslands mit kompatiblen Höhen und der Schweizer Beitrag zur Ausgleichung des Europäischen Netzes (REUN/UELN). Dies führte zu den in den Kapiteln 3.2 bis 3.4 erwähnten Aktivitäten von 1953 bis 1956 im Schweregrundnetz SGN53 und auf den Linien des REUN [Hunziker, 1959].

1962 wurde von Schürer [Kobold, 1962, Kapitel 3] vorgeschlagen, auf dem ganzen Netz des Landesnivellements orthometrische Höhen zu berechnen, welche auf aktuellen Schweremessungen basieren. Dies bedeutete, dass auf allen Linien, die nicht Bestandteile des REUN waren, noch Schweremessungen durchzuführen waren. Diese Messungen wurden ab 1974 in Angriff genommen. Seither werden in der Regel im gleichen Jahr wie die Messungen für das Nivellement auch Schweremessungen durchgeführt. Bis 1988 wurden die Messungen jeweils von W. Fischer (üblicherweise mit dem LCR-Gravimeter G317) ausgeführt (ein Beispiel der Grundlagen, der Messung und Auswertung ist in [Fischer, 1984] beschrieben). Nach seiner Pensionierung übernahm E. Klingelé die Arbeiten bis 2004. Seither werden die Schweremessungen für das Landesnivellement von swisstopo durchgeführt. Zunächst erfolgten diese Messungen bis 2007 ebenfalls immer mit dem Gravimeter LCR G317. Die Grundlagen der Messung und Auswertung sind in [Schlatter et al. 2005] gegeben. Danach wurde gemeinsam von swisstopo und der ETH Zürich ein Scintrex CG-5 beschafft, welches aber erst ab 2011 produktiv für das Landeshöhennetz nutzbar war. Seit 2018 liegen nach der Messung der Linie Brugg-Koblentz erstmals auf sämtlichen Haupt- und Nebenlinien des Landesnivellements Schweremessungen vor. Seit 2020 erfolgen die Messungen mit dem Scintrex CG-6 [Marti und Condamin, 2021].

Die Kriterien für die Punktdichte der auszuführenden Messungen wurde gegenüber den ursprünglichen Untersuchungen in der Testschleife (siehe Tabelle 3-1) ab 1989 erhöht. Heute wird eine maximale Horizontalabstand zwischen benachbarten Punkten von etwa 1 km und eine maximale Höhendifferenz von 30 m (Schweredifferenz kleiner 10 mGal) eingehalten. Dies ergibt die in Abbildung 3-19 sichtbare heterogene Punktverteilung auf den Linien je nach Messjahr und Steilheit des Geländes. Wegen der verlangten grossen Punktdichte muss deshalb sehr oft auf Zwischenpunkten (Nieten) des Nivellements gemessen werden. Heute sind aber auch diese in der Fixpunkt-Datenbank (FPDS/FiDa) enthalten und koordinatenmässig gut bestimmt. Derzeit umfasst die Datenbank der Schweremessungen für das Landesnivellement ca. 7700 Punkte.

Heute liegen zwar auf allen Linien des Landesnivellements Schwerewerte vor, es gibt jedoch noch einige Linien, welche noch aus den 1950er-Jahren stammen (Worden-Gravimeter) und somit eine reduzierte Genauigkeit aufweisen. Für den Zweck der Korrektur der Nivellementmessungen genügt deren Qualität aber durchaus. Das Problem mit diesen Messungen ist vielmehr, dass ein Grossteil der damaligen Punkte in der Zwischenzeit zerstört und deshalb für die Reduktion aktueller Nivellementmessungen kaum noch brauchbar ist. Deshalb werden die Schweremessungen entlang der Nivellementlinien auch in Zukunft noch weitergeführt werden.

Als Anschlusspunkte für die Messungen für das Landesnivellement wurden die jeweils aktuellen Werte des SGN53 (korrigiert um -15 mGal), des Schwerenetzes 1. Ordnung, des SNGN83, des SG95 oder des LSN verwendet. Es treten also kleine Inhomogenitäten auf, die nicht korrigiert wurden. Für die Berechnung von

Korrekturen für das Landesnivellement sind diese Unterschiede im Schweredatum allerdings nur von marginaler Bedeutung.



Abbildung 3-19: Schweremessungen für das Landesnivellement (Stand 2021)

4 Internationale und ausländische Schwerenetze

4.1 Frühe Definitionen des Schweredatums

Die absolute Messung der Schwere war im 19. Jahrhundert eine der schwierigsten Aufgaben der Geodäsie. Zwar waren die Grundprinzipien der Bestimmung mit Pendeln oder nach der Freifall-Methode gut bekannt, aber die tatsächliche Konstruktion eines Instruments, welches eine geodätisch brauchbare Genauigkeit lieferte, war nicht möglich. Deshalb wurden mit Pendeln vor allem Relativmessungen durchgeführt. Diese wurden auf einem «Fundamentalpunkt» gelagert, dessen absolute Schwere einigermaßen bekannt war. Somit entstanden in den meisten Ländern nationale Schwerenetze, welche sich auf einen eigenen Fundamentalpunkt stützten. Ein zweites grosses Problem der frühen Schweremessungen war auch die Bestimmung eines Massstabsfehlers für die Relativmessungen, was dann auch zu einer Anzahl von leicht unterschiedlichen Masseinheiten führte (z.B. französische mGal oder italienische mGal).

Das erste international anerkannte Schweredatum war dasjenige von Wien, welches 1900 von der IUGG akzeptiert wurde. Seine Genauigkeit wurde mit ± 10 mGal angegeben. Aber bereits 1909 wurde es durch das Potsdamer System abgelöst [Rieckmann und German, 1957]. Es stützt sich auf Messungen zwischen 1898 und 1904. Seine Genauigkeit wurde mit ± 3 mGal angegeben und war 16 mGal tiefer als das Wiener System. Verschiedene Experimente mit Absolutmessungen in den folgenden Jahrzehnten zeigten aber, dass auch der Potsdamer Wert immer noch zwischen 12 und 16 mGal zu hoch war.

Bereits in den 1940er Jahren wurde erkannt, dass sich ein Schweredatum nicht nur auf eine einzige Absolutstation stützen sollte, sondern dass ein Netz mit Relativmessungen nötig war, um eine Stabilität und Kontrolle zu haben, aber auch um den Schwerewert in den einzelnen Ländern verfügbar zu machen. Aber damals waren auch Relativmessungen nicht weltweit vorhanden. Erst in den 1950er Jahren wurden Relativgravimeter serienmässig hergestellt und damit für viele Forschungsinstitute erschwinglich. Dies führte rasch zu einer globalen Abdeckung mit Schweremessungen und 1956 zu einem «First Order World Gravity Net» (FOWGN) mit 34 Stationen, welche zur Definition des Schweredatums dienen sollten. Es wurden verschiedene Ausgleichungen dieses Netzes präsentiert, welche aber nur unbefriedigende Resultate lieferten. Das Hauptproblem bestand darin, dass die absoluten Pendelmessungen, welche zur Datumsfestlegung nötig waren, systematisch verfälscht waren und dass die Relativmessungen einen nur schlecht bestimmbaren Massstabsfaktor aufwiesen. Dies führte 1962 zur Entscheidung, drei sehr lange Kalibrationslinien zu beobachten: die amerikanische Linie (ACL) von Ushuaia (Feuerland, Argentinien) nach Point Barrow (Alaska), die europäisch-afrikanische Linie (EACL) von Kapstadt (Südafrika) bis Hammerfest (Norwegen) und die westpazifische Linie (WPCL) von Christchurch (Neuseeland) bis Sapporo (Japan). Diese Linien sollten sowohl mit Pendeln als auch mit Relativ-Gravimetern beobachtet und untereinander verbunden werden. Das Problem der genauen absoluten Lagerung der Schweremessungen konnte aber auch so nicht gelöst werden. Dies wurde erst möglich, als Ende der 1960er Jahre die ersten experimentellen Absolutgravimeter nach der Freifall-Methode entwickelt wurden (z.B. von Cook, Faller oder Sakuma), welche eine Genauigkeitssteigerung in den Bereich von besser als 0.1 mGal erreichten. Dies führte 1971 zur Gesamtausgleichung aller bisherigen Messungen unter der Leitung von Morelli, welche unter dem Namen IGSN71 publiziert wurde [Morelli et al., 1971].

4.2 Das IGSN71

Das «International Gravity Standardization Net 1971» (IGSN71) [Morelli et al., 1971] ersetzte das bis dahin gültige Potsdamer Schweredatum und bildete insofern eine Neuheit, als dass nun nicht mehr eine einzelne Messstation zur Definition des Schweredatums diente, sondern ein Netzwerk von weltweit 1854 Stationen, welches gemeinsam ausgeglichen wurde. Für die Ausgleichung wurden vor allem Relativmessungen (ca. 24'000) und Pendelmessungen (ca. 1200) verwendet. Tatsächliche Absolutmessungen im modernen Sinne wurden nur 10 verwendet (auf 8 Stationen; davon 5 in den USA und je eine in Frankreich, 1 in England und 1 in Kolumbien), auf welche das ganze Netz gelagert wurde. Als Unbekannte ergaben sich die Schwerewerte auf den 1854 Stationen, 96 Skalenfaktoren für die Gravimeter und (nur) 26 Drifts. Als Gezeitenkorrektur wurde das Longman-Modell [Longman, 1959] plus die Honkasalo-Korrektur angewendet. Die Genauigkeit des IGSN71 wird mit ± 0.1 mGal angegeben. Für den bisherigen Fundamentalpunkt in Potsdam ergab sich in IGSN71 ein Wert, welcher ziemlich exakt 14.0 mGal tiefer war als der bis dahin verwendete. Wegen der Massstabsunsicherheiten war es allerdings nicht möglich, überall

einfach diesen Offset anzuwenden, um ältere Messungen zu korrigieren. Je nach Gebiet ergaben sich andere Korrekturwerte zum alten Potsdamer Datum.

Für die Schweiz sind in der Originalpublikation des IGSN71 neun Punkte aufgelistet: fünf davon liegen in der Umgebung von Genf (darunter der Meridianraum im Keller des Observatoriums, die Messhalle am Institut für Physik und ein Punkt am Flughafen), drei Punkte in der Umgebung von Zürich (Sternwarte, Fundamentalstation an der ETH sowie der Punkt am Flughafen) und ein weiterer Punkt 1957 von Morelli beobachtet in Gebenstorf (AG). Später wurde auch noch die Sternwarte in Basel (Binningen) an das Netz angeschlossen. Die ausgewiesenen Genauigkeiten der Schweizer Stationen liegen alle zwischen 0.03 und 0.05 mGal. Für den Fundamentalpunkt in Zürich wurde ein Schwerewert von 980'652.13 mGal erhalten. Dies ist 14.87 mGal tiefer als der bis dahin verwendeten Wert im Potsdamer System (980'667 mGal). Für die praktische Realisierung des IGSN71 in der Schweiz wurde der Wert noch auf 980'652.0 mGal gerundet (Differenz von -15 mGal zum Potsdamer System).

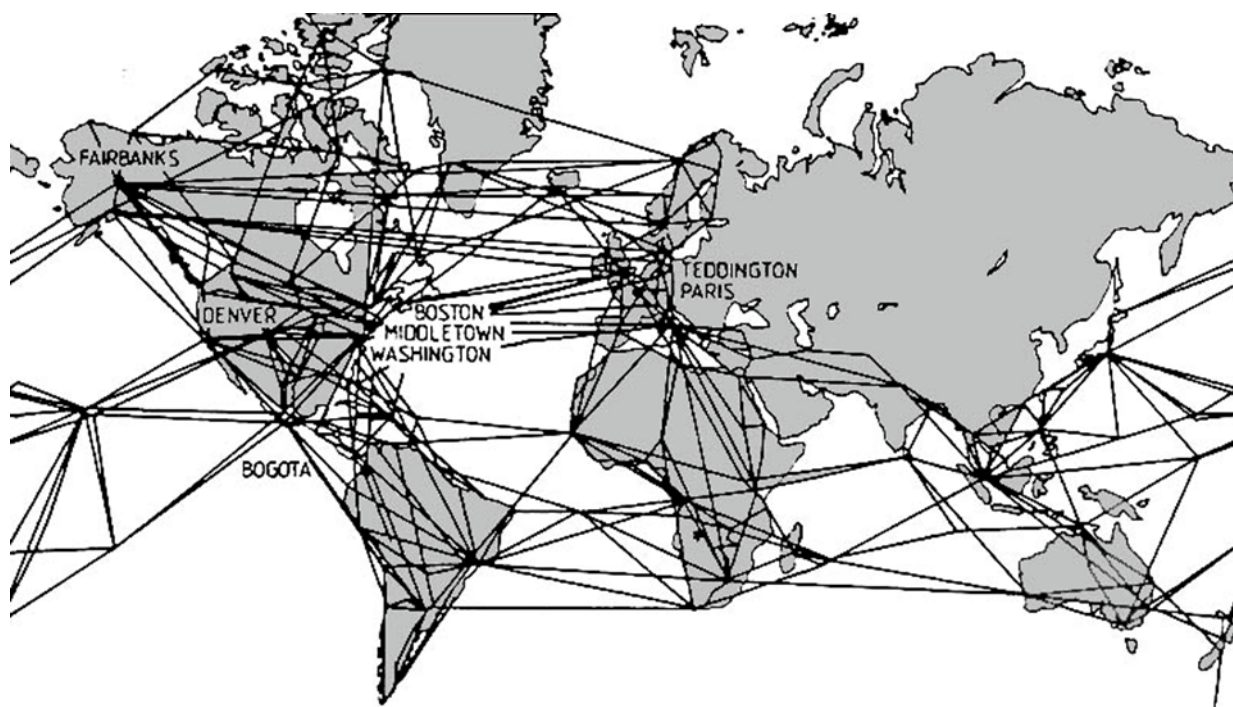


Abbildung 4-1: Das internationale Schwerenetz IGSN71

Im Verzeichnis der gravimetrischen Basisstationen des amerikanischen Verteidigungsministeriums [ACIC, 1971] sind neun Schweizer Stationen enthalten (neben den Hauptpunkten in Genf und Zürich auch die SGN53-Punkte in Altdorf, Bellinzona, Interlaken, Landquart, Sion, Solothurn und Yverdon). Diese wurden durch das Anbringen eines konstanten Offsets von -14.88 mGal vom Potsdamer System ins IGSN71 transformiert.

Alle «offiziellen» IGSN71-Punkte in der Schweiz wurden eigentlich nie wirklich für praktische Arbeiten verwendet und sind heute auch alle zerstört oder nicht mehr brauchbar. Sie verloren spätestens 1978 durch die ersten Absolutmessungen ihre Bedeutung [Kahle et al, 1981]. Durch die Lagerung auf diesen Absolutpunkten darf das SNGN83 als erste verdichtete Schweizer Realisierung des IGSN71 bezeichnet werden. Alle späteren Schwerenetze der Schweiz stützten sich jeweils auf aktuelle Absolutmessungen und nicht auf die publizierten IGSN71-Werte.

Die Diskrepanz zwischen der Genauigkeit des IGSN71 und der ab den späten 1970er-Jahren möglichen Absolutmessungen war rasch eine störende Tatsache. Dies führte in den 1980er Jahren zum Versuch, ein neues, auf Absolutmessungen basierendes System aufzubauen. Dieses «International Absolute Gravity Basestation Network» (IAGBN) [Boedeker, 1993] enthielt 36 Absolutstationen, auf denen auch die zeitliche Schwereänderung permanent überwacht wurde. Trotzdem bleibt IGSN71 bis heute das offizielle internationale Schweresystem, obwohl es den heutigen Ansprüchen an Genauigkeit und Verfügbarkeit der Punkte schon lange nicht mehr genügt.

Heute bestimmt eigentlich jedes Land sein Schweregrundnetz mit Absolutmessungen selbst, ohne sich noch um IGSN71 zu kümmern. Das führt zu einem modernen Ansatz für die Definition eines internationalen gravimetrischen Referenzsystems (ITGRS², International Terrestrial Gravity Reference System). Dabei wird in erster Linie darauf geachtet, dass die verschiedenen Absolutgravimeter auch wirklich «absolut» messen und untereinander kompatible Resultate liefern. Dies zeigt die zentrale Rolle der internationalen Vergleichskampagnen von Gravimetern, welche seit 1981 regelmässig stattfinden. Als Realisierung des ITGRS kann dann jede mit einem solchen kalibrierten Instrument durchgeführte Absolutmessung gelten, welche nach Standard-Richtlinien ausgewertet wurde. Auf den Core-Stations des ITGRS (Referenzrahmen ITGRF) sollen zudem permanent die Schwereänderungen mit einem Super-Conducting Gravimeter aufgezeichnet werden [Wilmes et al. 2016; Wziontek et al. 2021].

4.3 Europäische Schwerenetze

Die ersten Arbeiten für ein europäisches Schwerenetz standen im Zusammenhang mit dem Aufbau einer europäischen Gravimeter-Kalibrationslinie [Kneissl, 1958]. Der Aufbau dieser Eichlinien wurde 1954 beschlossen. Gemessen wurde eine Hauptlinie von Hammerfest nach Rom und eine Kontrolllinie von Edinburgh nach Bagnères in den französischen Pyrenäen. Diese beiden Linien wurden durch Querverbindungen verknüpft. Dadurch ergab sich ein netzförmiger Aufbau. In der Schweiz war der Punkt am physikalischen Institut in Genf Bestandteil des geplanten Netzes. Ein Grossteil der Gravimeter-Messungen wurde von Morelli 1956 durchgeführt, darunter auch zwei zusätzliche Schweizer Punkte in Gebenstorf und am Flughafen Zürich. Der Schlussbericht [Kneissl und Marzahn, 1962] enthält die ausgeglichenen Schwerewerte von Genf und Zürich mit einer Genauigkeit leicht schlechter als ± 0.1 mGal.

Mit dem Aufkommen der Absolutgravimeter verlor die Idee eines übergeordneten Schwerenetzes an Bedeutung, da die einzelnen Länder in der Lage waren, ihre nationalen Schwerenetze durch eigene Messungen zu definieren. In den 1990er Jahren wurde aber erkannt, dass eine gemeinsame Grundlage in Europa doch sinnvoll ist. Dies führte zu den Aktivitäten des «United European Gravity Network 1994» (UEGN94) [Boedecker et al. 1995]. Dabei wurden 499 Stationen in 11 westeuropäischen Ländern gemeinsam ausgeglichen. Die Schweiz beteiligte sich nicht an diesem Projekt.

Mit der Öffnung nach dem Zerfall der Sowjetunion wurden die vorher als geheim klassifizierten Schwere-daten aus Osteuropa zugänglich. Dies führte zunächst (1998–2002) zum Projekt UNIGRACE (Unification of Gravity Systems in Central Europe), bei welchem die Schwerenetze West- und Osteuropas auf 19 Absolut-Punkten in 12 Ländern verbunden wurden. Anschliessend wurde eine gesamteuropäische Ausgleichung unter dem Namen UEGN02 (Unified European Gravity Reference Network 2002) realisiert [Boedecker, 2007]. Dieses Netz umfasst etwa 1500 Stationen, wobei die Punktdichte in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich ist. Die Schweiz beteiligte sich an diesem Projekt mit dem vollständigen Datensatz, wie er auch für das Schweregrundnetz 1995 [Arnet und Klingelé, 1997] verwendet wurde. Die ausgewiesene Standardabweichung der Schweizer Punkte im UEGN02 liegt in der Grössenordnung von 0.01 mGal (Maximum 0.035 mGal). Die Unterschiede in den Schwerewerten zum SG95 liegen aber teilweise über 0.1 mGal, obwohl beide Lösungen auf denselben Messungen basieren. Als Grund dafür werden Massstabsprobleme der Relativgravimeter vermutet. Die Resultate des UEGN02 blieben ohne weiteren Einfluss für die gravimetrischen Arbeiten in der Schweiz, und es wird wohl in Zukunft auch kein neues Europäisches Schwerenetz mehr geben.

² Vor 2020 wurden die Akronyme IGRS und IGRF verwendet.

4.4 Die nationalen Schwerenetze der Nachbarländer

In **Deutschland** bildet das «deutsche Schweregrundnetz 1994» (DSGN94) die Basis der gravimetrischen Arbeiten. Dieses Netz besteht aus 32 Absolutpunkten (Laborstationen, mit FG5 beobachtet), welche auch durch Relativmessungen untereinander verbunden sind. Zwei Punkte des DSGN94 (Freiburg und Wangen) dienen auch als Verknüpfungen zum Schweizer Schwerenetz.

Als erste Verdichtung des DSGN94 dient das deutsche Hauptschwerenetz 1996 (DHSN96) mit einigen hundert Punkten. Zurzeit läuft der Aufbau eines neuen DHSN16, welches sich vor allem auf Absolutmessungen auf Feldstationen (beobachtet mit A10) stützt. Die einzelnen Bundesländer unterhalten weitere Verdichtungen des Schwerenetzes. So existiert in Baden-Württemberg ein aktuelles Schwerenetz erster Ordnung, welches mit Absolutmessungen (A10) und Relativmessungen beobachtet wird. Einige Punkte liegen auch in der Nähe der Schweizer Grenze, z.B. in Lörrach, Niedergeisbach, Laufenburg, Waldshut, Lienheim und Singen. Von Schweizer Institutionen wurde bisher noch keiner dieser Punkte beobachtet. Dieses Netz wurde aber 2010 vom LGL (Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung) auch mit der Absolutstation in Zürich verbunden. Systematische Unterschiede zwischen dem deutschen und dem schweizerischen Schweredatum wurden dabei nicht festgestellt.

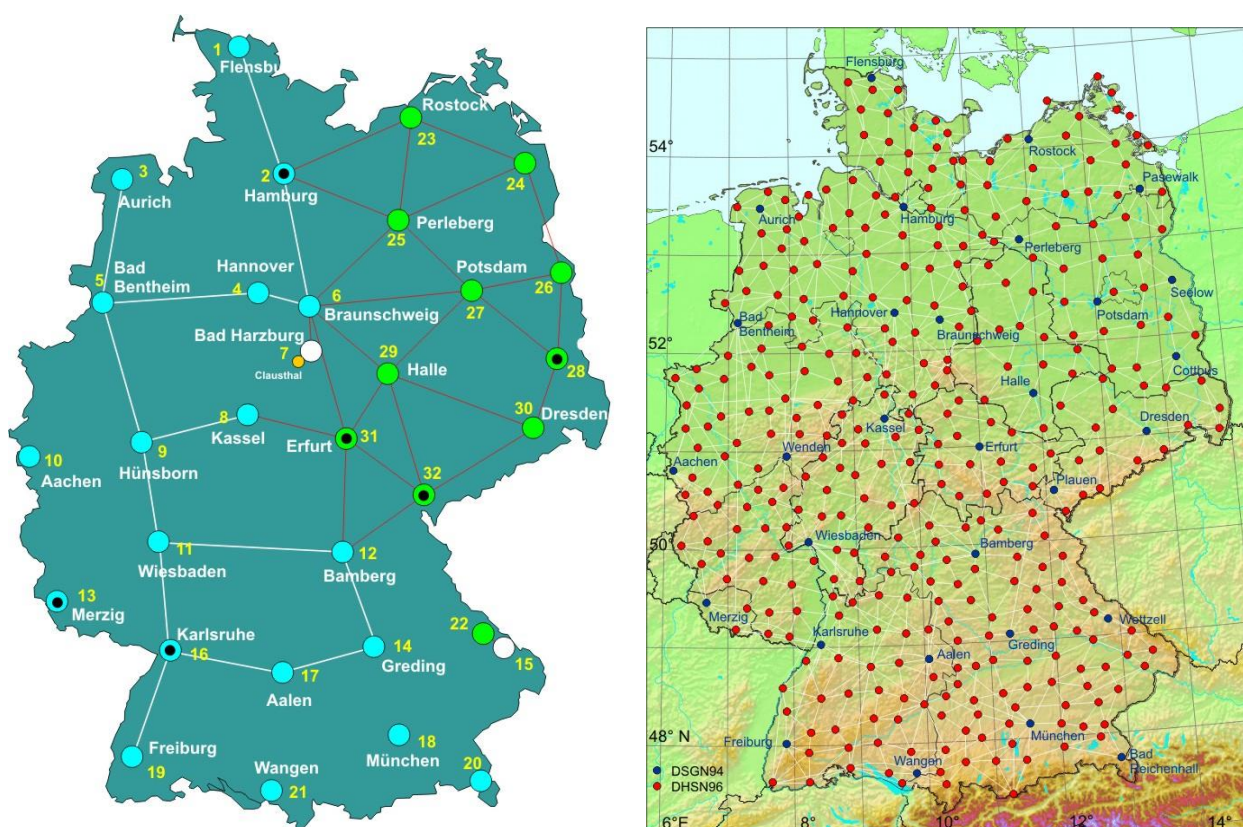


Abbildung 4-2: Deutsches Schweregrundnetz DSGN94 und Deutsches Hauptschwerenetz DHSN96

In **Österreich** ist das BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) für den Unterhalt des Schwerenetzes zuständig. Das gut unterhaltene und regelmässig nachgemessene ÖSGN (österreichisches Schweregrundnetz) basiert auf 42 Absolutpunkten 0. Ordnung. Das hierarchisch aufgebaute Netz 1. bis 3. Ordnung besteht total aus ca. 800 Relativpunkten. In unmittelbarer Umgebung der Schweiz befinden sich drei Absolutstationen (Tisis, Koblach und auf dem Pfänder), welche alle mit dem schweizerischen Netz verbunden sind. Der Absolutpunkt in Chur ist zugleich Bestandteil des ÖSGN. Zwei weitere Verknüpfungspunkte 2. Ordnung bestehen in St.Margrethen und Vinadi. Weitere mögliche Verknüpfungspunkte in Bregenz und Feldkirch (1. Ordnung), sowie in Dornbirn, Höchst und Lustenau (2. Ordnung) wurden von Schweizer Seite noch nie beobachtet.

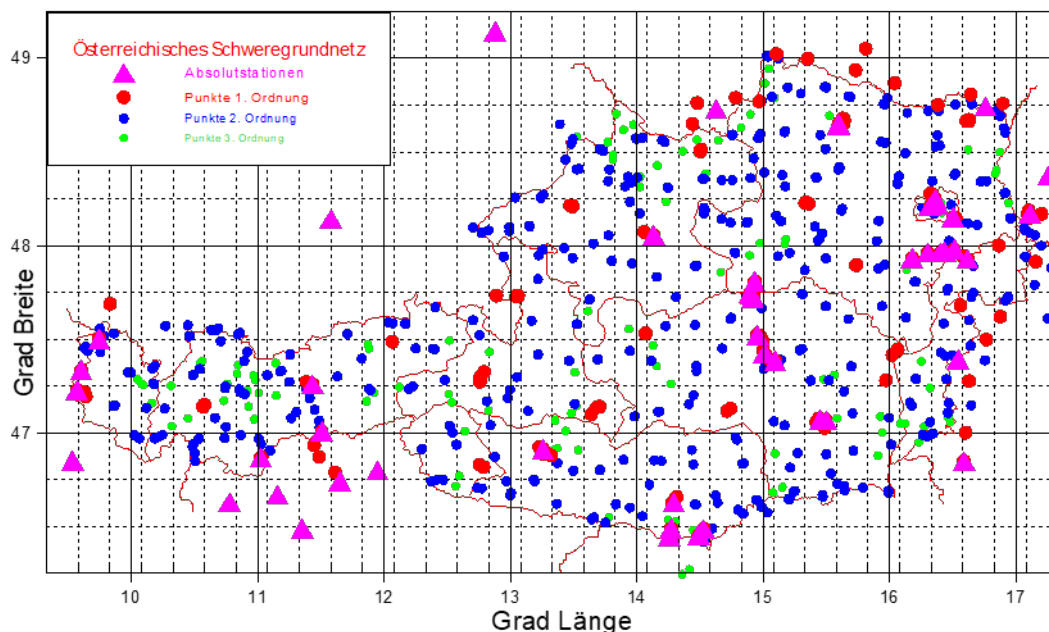


Abbildung 4-3: Das österreichische Schweregrundnetz ÖSGN [Ruess, 2002]

In **Frankreich** unterhält das IGN (Institut géographique national) das «réseau de référence gravimétrique». Es stützt sich auf die Punkte des «réseau de base français» (RBF), welches in erster Linie ein GNSS-Netz ist (vergleichbar mit unserem LV95-Netz). Von den ca. 1000 Punkten des RBF ist etwa ein Viertel mit Absolutgravimetern (A10) beobachtet. Der Rest ist durch Relativmessungen angeschlossen. Die Genauigkeit der meisten Punkte liegt in der Grössenordnung von 0.02 mGal. Wegen der grossen Anzahl der Punkte des französischen Netzes ergeben sich auch viele potentielle Verknüpfungen mit der Schweiz, von denen bisher etwa 10 gemessen wurden. Die drei LV95-Punkte Martigny (RAB), Piton und La Givrine sind gleichzeitig auch Punkte des RBF und werden deshalb auch vom IGN gravimetrisch vermessen.

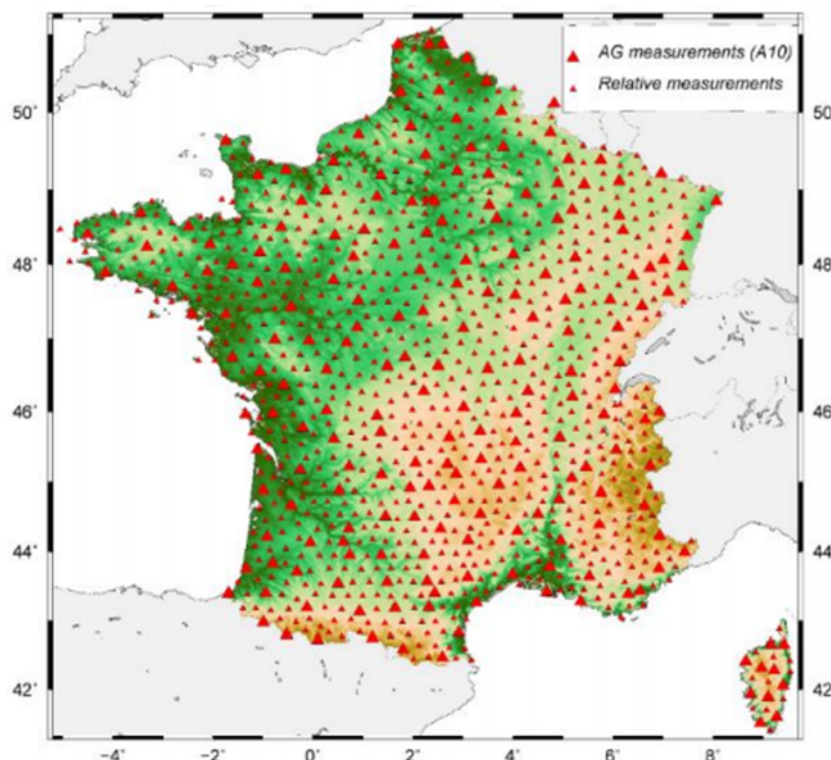


Abbildung 4-4: Französisches Schweregrundnetz

In **Italien** erfolgte in den letzten Jahren trotz einiger Initiativen [z.B. Marson und Palmieri, 1994] keine offizielle Modernisierung des nationalen Schweregrundnetzes. Die letzten abgeschlossenen Arbeiten stammen noch von Morelli und Marson aus den 1960er und 1970er Jahren. Dies führte zum Netz erster Ordnung FOGN77 [Marson und Morelli, 1978], welches sich auf die absoluten Schweremessungen auf sechs Stationen von 1976/77 mit dem damals neuartigen transportablen Senkrechtwurf-Gravimeter des IMGC (heute INRiM, Turin) stützten. Der Schweiz am nächsten gelegen war ein Punkt am Politecnico di Milano (PoliMi). Dieser Punkt wurde für das SG95 verbunden, ist aber inzwischen zerstört. Nur noch ein nicht sehr stabiler Exzentrums punkt bleibt messbar. In den 1990er Jahren wurde ein neues Grundnetz unter dem Namen IZOGN_1995 (Italian Zero Order Gravity Net) begonnen aber nie abgeschlossen. Seit 2021 läuft aber ein neues Projekt unter Leitung des PoliMi zur Erneuerung des Schweregrundnetzes. Dabei sollen ca. 10 neue Absolutstationen eingerichtet und gemessen werden. Die Punkte im südlichen Teil des Landes wurden 2022 beobachtet. Eine Übersicht zum Italienischen Schweregrundnetz ist in [Berrino, 2020] zu finden.

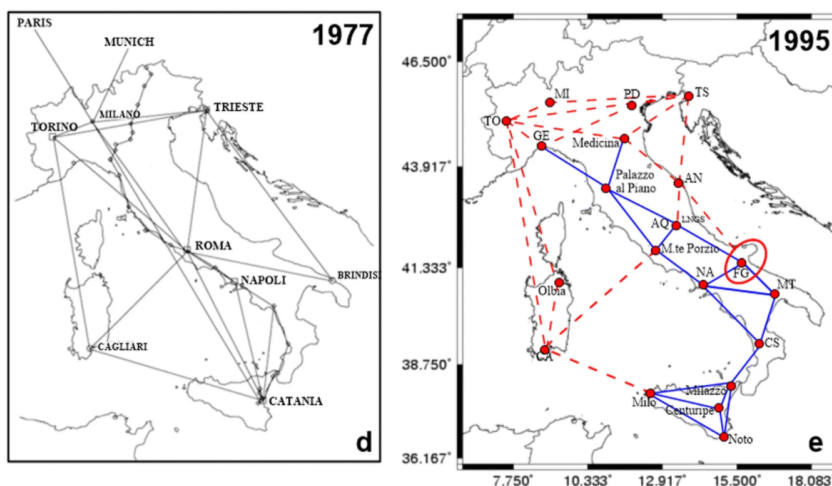


Abbildung 4-5: Italienisches Schweregrundnetz FOGN77 (inkl. Punkte der europäischen Traverse) und Entwurf für IZOGN_1995 (nur die blauen Linien wurden gemessen)

5 Konzept des Landesschwerenetzes

5.1 Zweck der Erneuerung

Der Aufbau eines Landeschwerenetzes (LSN) oder Schweregrundnetzes (SG) ist in den meisten Ländern eine Aufgabe der Landesvermessung. Die Schweiz bildete darin lange eine Ausnahme. Das Schweregrundnetz wurde als wissenschaftliches Messnetz betrachtet und durch die Schweizerische Geodätische Kommission (SGK) erstellt und unterhalten. Die Feldarbeiten und Berechnungen wurden dabei zum grössten Teil von der ETH Zürich durchgeführt. Swisstopo hatte vor allem die Aufgabe der Dokumentation (im Rahmen der Dokumentation des Landesnivellements) übernommen.

Mit den personellen Veränderungen an der ETH Zürich (Pensionierung von Prof. Klingelé) entstand 2003 bei swisstopo das Bedürfnis die für die Landesvermessung nötigen Schweremessungen selber durchführen zu können. Dabei standen die Messungen entlang der Nivellementlinien im Vordergrund. Es wurde aber erkannt, dass dafür auch eine langfristige Wartung des Schweregrundnetzes nötig war. Daraus entstand das Projekt GRAV2003 [Marti und Schneider, 2005], bei welchem insbesondere der Wissenstransfer, aber auch die Übernahme der Daten und Auswertesoftware, im Zentrum standen [Schlatter et al. 2005]. Dabei sollte auch ein Konzept für den langfristigen Unterhalt des Schweregrundnetzes erarbeitet werden. Eine zentrale Rolle spielte dabei die enge Zusammenarbeit mit dem METAS.

Das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) beschaffte 1999 ein FG5 (Seriennummer 209) im Rahmen des Wattwaage-Projekts (Neudefinition des Kilogramms). METAS ist somit im Besitz des einzigen Absolutgravimeters der Schweiz und in der Lage, das Grundgerüst für ein schweizerisches Schweregrundnetz zu realisieren. Ziel war, die Synergien zwischen den Aufgaben der Metrologie und jenen der Landesvermessung zu nutzen und für die nötigen Absolutmessungen eine Vereinbarung zur langfristigen Zusammenarbeit abzuschliessen.

Die Neukonzeption des Landesschwerenetzes sah absolute Schweremessungen, ergänzende Relativmessungen sowie die Neuausgleichung und Dokumentation des Netzes vor. Diese Aufgabe wurde auch in die Leistungsvereinbarung und die Zielvereinbarungen von swisstopo aufgenommen.

Unter dem Titel Landesschwerenetz 2004 (LSN2004 oder kurz auch nur LSN) sollten in Zukunft alle Arbeiten der gravimetrischen Landesvermessung in der Schweiz zusammengefasst werden. Das LSN ist dabei als Element der neuen Landesvermessung LV95 zu betrachten. Die Referenzierung des neuen schwerfeldbezogenen, strengen Höhensystems LHN95 war dabei die primäre Zielsetzung. Die Jahreszahl «2004» bezieht sich auf den Beginn der Aktivitäten zum neuen LSN.

Die gesetzliche Grundlage für das Errichten und den Betrieb des LSN durch swisstopo ist in der Landesvermessungsverordnung³ festgelegt. Die Daten des LSN sind als Geobasisdaten (Nr. 34.8 im Geobasisdatenkatalog) Teil der «Nationalen Geodaten-Infrastruktur» (NGDI) und als solche der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Zudem sollten auch langfristig der Unterhalt und die Nachführung des LSN sichergestellt werden.

5.2 Zielsetzung und Grundkonzept

Das bisherige Schweregrundnetz SG95 [Arnet und Klingelé, 1997] mit dem Teilnetz 0. Ordnung (Absolutstationen) und den Grundnetzen 1. und 2. Ordnung (Relativmessungen) sollte aufgrund einheitlicher Spezifikationen überarbeitet, die vorhandenen Messdaten validiert, durch neue Messungen ergänzt und als Gesamtnetz vollständig neu ausgeglichen werden. Dabei wurde gemäss dem Konzept der «Combined Geodetic Networks» [Schneider et al. 2003] eine möglichst direkte Verknüpfung der verschiedenen geodätischen Referenznetze (GNSS, Nivellement und Schwere) der Landesvermessung angestrebt. Der Dokumentation der Messstationen, der Schweremessdaten sowie der ausgeglichenen Schwereresultate sollte besondere Beachtung geschenkt werden.

Gemäss dem Konzept «Combined Geodetic Networks» sollen die verschiedenen geodätischen Messnetze wie GNSS-, Nivellement- und Schwerenetze sowie astrogeodätische Netze etc. unter Berücksichtigung von Schwerfeldmodellen zu einem in sich konsistenten geodätischen Referenznetz der Landesvermes-

³ LVV, SR 510.626, Art. 2

sung «CH-CGN» vereinigt werden [Brockmann et al. 2004]. Essentiell ist dabei die Verbindung der rein geometrischen 3D-Referenzdaten (GNSS) mit den schwerefeldbezogenen geodätischen Messungen. Dabei gelingt es z.B. durch die Kollokation von Nivellement und Schwere mit der GNSS-Positionierung, Geoidprofile auf einfache Art zu bestimmen (GNSS-levelling). Wichtig ist dabei, dass die einzelnen Beobachtungsgruppen (Teilnetze) möglichst frei von systematischen Fehlereinflüssen und mit genügender Genauigkeit absolut gelagert (referenziert) sind.

Schwerefeldinformation kann auf verschiedenste Art in die kombinierten geodätischen Netze einfließen: einerseits über die Geoidbestimmung (Astrogeodäsie, Gravimetrie, Satellitengeodäsie, Massenmodelle etc.) und andererseits über die potentialtheoretisch strenge Berechnung von orthometrischen Höhen oder Normalhöhen (Nivellement und Schwere). Aufgabe der gravimetrischen Referenznetze der Landesvermessung ist es dabei, einen absoluten, genauen und zuverlässigen Bezugsrahmen für die Schwerefelddaten in der Schweiz zu liefern und langfristig aufrecht zu erhalten.

Neben diesen Aufgaben der Landesvermessung soll das Schweregrundnetz auch wissenschaftlichen Untersuchungen dienen. Dabei stehen vor allem geodynamische Untersuchungen im Vordergrund. Sie erfassen auch die zeitlichen Veränderungen der Geometrie der obersten Erdkruste mit hoher Genauigkeit. Die detektierten relativen Geschwindigkeiten der tektonischen Bewegungen liegen dabei in der Grössenordnung von 1 bis 2 mm/Jahr. Es ist leicht einsehbar, dass diese geometrischen Veränderungen auch Variationen im Schwerefeld zur Folge haben. Dabei ist es allerdings nicht einfach vorauszusagen, mit welcher Schwereänderung sich die Höhenänderungen abbilden. Isostatische oder tektonisch bedingte Massenverschiebungen im Untergrund könnten z. B. ein Grund sein für unvorhersehbare Variationen in den Zeitreihen von hochgenauen gravimetrischen Stationen. Bisher konnten in der Schweiz säkulare Schwereänderungen nicht nachgewiesen werden. Dazu war einerseits die Messunsicherheit der alten absoluten Schweremessungen zu gross und andererseits waren die vorhandenen Zeitreihen zu kurz. Mit der heute erreichbaren Qualität der absoluten Messungen können aber mittelfristig signifikante Ergebnisse erwartet werden. Die geodätische Beobachtung von säkularen Schwereänderungen ist daher als Nebenziel bei der Konzeption eines Landesschwerenetzes aufzunehmen. Aus der zeitlichen Veränderung des Schwerefeldes können eventuell langfristig Erkenntnisse bezüglich Massenverschiebungen im Untergrund (z.B. isostatische Bewegungen der Erdkruste) gewonnen werden.

Die Hauptaufgabe der gravimetrischen Landesvermessung besteht aber in der Bereitstellung eines Schweregrundnetzes, dessen Punkte von den benutzenden Personen als Anschlüsse für Detailvermessungen benutzt werden können. Deshalb müssen die Punkte des Schweregrundnetzes frei zugänglich und ausreichend dokumentiert sein. Die Messungen für das Schweregrundnetz werden auf absolute Schweremessungen im In- und Ausland abgestützt. Eine Verdichtung des absoluten Schwerenetzes erfolgt durch hochpräzise relative Schweremessungen.

Die Arbeiten im Schweregrundnetz umfassen demnach die folgenden Teile:

- Rekognoszieren und Einrichten neuer Punkte (Absolutstationen)
- Durchführen absoluter Schweremessungen
- Relative Schweremessungen zwischen den Punkten des Schweregrundnetzes und Nachmessungen
- Koordinaten- und Höhenbestimmung der Punkte
- Gesamtausgleichung der Messungen
- Verbindung mit Schwerenetzen der Nachbarländer
- Wiederholte Begehung der Punkte
- Unterhalt, Nachführung und Dokumentation der Punkte

Neben dem Schweregrundnetz bilden auch die Schweremessungen auf den Linien des Landeshöhennetzes einen Bestandteil der geodätischen Landesvermessung, sind aber kein eigentlicher Bestandteil des Landesschwerenetzes. Die Genauigkeitsanforderungen richten sich nach dem Verwendungszweck (Berechnung der Potentialdifferenzen) und sind deshalb mit ca. 0.1 mGal bedeutend geringer als im Schweregrundnetz. Bei diesen Messungen ist darauf zu achten, dass alle Linien des Landesnivellements mit genügender Dichte (Punktabstand der Schweremesspunkte) beobachtet werden und dass diese Messungen einheitlich dokumentiert werden.

Die Verwaltung der umfangreichen Schweremessungen für die gravimetrische Landesaufnahme, wie sie von der SGPK durchgeführt wurden, ist grundsätzlich keine Aufgabe der Landesvermessung. Diese Daten sind aber für viele Aufgaben der Landesvermessung unverzichtbar (Geoidbestimmung, Schwereinterpolation). Deshalb werden auch sie bei swisstopo verwaltet und archiviert. swisstopo ist auch sehr gut geeignet, um als Datenzentrum für diese Daten zu dienen. swisstopo bietet an, diese Daten zu validieren und die Datenauslieferung und die Berechnung von interpolierten Schweren an externe Kunden zu übernehmen.

swisstopo ist zudem Ansprechpartner für internationale Kontakte mit den Nachbarländern und den internationalen Organisationen wie dem BGI (Bureau Gravimétrique International) und dem IGFS (International Gravity Field Service). Über diese Kontakte und mit Unterstützung durch das METAS ist auch die Anbindung des LSN an die internationalen metrologischen Standards sicher zu stellen.

Das Schweregrundnetz der Schweiz (SG95) aus den Jahren 1992–1995 erfüllte die Anforderungen an eine moderne gravimetrische Landesvermessung grösstenteils. Die Ergebnisse der Arbeiten sind auch in der Publikationsreihe der SGK genügend dokumentiert [Arnet und Klingelé, 1997]. Mit dem Wechsel der Verantwortlichkeit für diese Geobasisdaten drängten sich aber trotzdem einige Erneuerungen auf.

Die wichtigsten Schwachpunkte lagen beim bisherigen Absolutnetz von SG95, wo einzelne Stationen zerstört, andere vermutlich instabil sind. Das europäische Projekt «European Combined Geodetic Network» (ECGN) von EUREF, welches absolute Schweremessungen auf den Fundamentalstationen in Europa forderte, hat den Anstoss für die Neumessung auf der Station Zimmerwald gegeben. Diese Fundamentalstation der Landesvermessung ist gleichzeitig «Core Station» von ECGN und sollte auch eine Hauptstation des LSN werden. Gemäss den Anforderungen des ECGN ist die Schwere auf dieser Station permanent (z.B. durch ein supraleitendes Gravimeter) oder zumindest periodisch durch wiederholte Absolutmessungen zu bestimmen. Zwischen den Absolutmessungen empfiehlt sich ein permanentes Monitoring (z.B. durch ein Gezeitengravimeter, dessen Drift durch spezielle Massnahmen kontrolliert wird).

Die Messungen auf einigen Absolutstationen sollten wiederholt werden. Die geometrische Verteilung der Stationen über das Landesgebiet wäre ebenfalls zu optimieren. Ein Netz von 10–12 gut geeigneten Absolutstationen, verteilt über alle Landesteile und in Verbindung mit den grenznahen Absolutstationen der Nachbarländer, genügt als Basis für das LSN.

Das hochgenaue Absolutnetz ist das Fundament der gravimetrischen Landesvermessung. Es ist selbstverständlich, dass Veränderungen an diesem Teil auch Folgen für alle untergeordneten Netzteile haben. Es muss deshalb in jedem Fall eine strenge Neuausgleichung der Grundnetze 1. und 2. Ordnung erfolgen. Aufgrund dieser Voraussetzung war es sinnvoll, die gesamte Netzanlage durch einen Neuentwurf aller Netzteile zu optimieren.

Neben dieser geodätischen Zielsetzung gilt es zu beachten, dass ein modernes Landesschwerenetz integrierender Bestandteil einer zeitgemässen Landesvermessung ist. Es bildet den nationalen gravimetrischen Bezugsrahmen und als solcher einen Georeferenzdatensatz in einer Nationalen Geodaten-Infrastruktur (NGDI). Dies wiederum stellt zusätzliche Anforderungen an die Sicherstellung der Erhaltung und Nachführung, die Dokumentation sowie die Verfügbarkeit der Daten für die Öffentlichkeit.

5.3 Netzentwurf des LSN

Aufbauend auf den Grundlagen des SG95 erfolgte eine Bereinigung und Ergänzung des Teilnetzes der Absolutstationen sowie eine Optimierung und Vereinheitlichung bei den Stationen und Netzverbindungen der Grundnetze 1. und 2. Ordnung. Im Hinblick auf eine konsequente Dokumentation der Stationen, Messdaten und Schwere-Ergebnisse wird eine einheitliche Punktnummerierung eingeführt.

Die vorhandenen Teilnetze aus dem SG95 wurden für den Netzentwurf des LSN grundsätzlich übernommen. Der hierarchische Aufbau des Netzes ist primär historisch begründet. Die Beibehaltung der 4 Ordnungsstufen war aber auch im Hinblick auf eine Gesamtausgleichung (bis zur 3. Ordnung) nach wie vor gerechtfertigt.

5.3.1 Netz 0. Ordnung

Das Netz 0. Ordnung besteht aus den Absolutstationen und deren Exzentren. Sie bilden das Grundgerüst des LSN. Die Verbindungen zwischen Absolutstationen und deren Exzentren werden oft und mit höchster

Genauigkeit gemessen. Auch die Punkte der Kalibrationslinie Interlaken–Jungfrauoch sind Bestandteil des Netzes 0. Ordnung.

Das Netz 0. Ordnung sollte also die bereits bestehenden Punkte in Lausanne, Chur, Zürich und auf dem Monte Ceneri enthalten. Hinzu kommt sicher die ECGN-Station Zimmerwald. Da im Labor des METAS in Wabern regelmässig absolute Schweremessungen durchgeführt werden, war es sinnvoll, auch diese Station ins LSN zu integrieren. Für die zerstörte Absolutstation in Pratteln sollte im Raum Basel ein Ersatz gefunden werden. Ebenfalls als Punkte 0. Ordnung dienen die Anschlüsse ans benachbarte Ausland.

Die beiden alten Absolutstationen in Brig und Interlaken waren ans SG95 nur durch Relativmessungen angeschlossen. Auch sie sollten wiederum ins LSN 0. Ordnung integriert werden. Allerdings lag die Station in Interlaken in einem instabilen Gebiet und die Station in Brig war inzwischen zerstört. Deshalb mussten auch für diese beiden Punkte Ersatzstandorte gefunden werden.

Die beiden alten Absolutpunkte im Gotthard-Strassentunnel (Bäzberg und Guspisbach) sind wegen ihrer schlechten Zugänglichkeit nicht als Referenzpunkte geeignet. Sie wurden in erster Linie für geodynamische Untersuchungen eingerichtet. An ihrer Stelle sollte eine neue Station in Andermatt eingerichtet werden.

Als weitere Ergänzung war ein Punkt im Engadin vorgesehen. Dort konnte in Zernez ein geeigneter Standort gefunden werden.

Dies ergab zusammen mit den sieben Punkten der Kalibrationslinie Interlaken–Jungfrauoch den Netzentwurf 0. Ordnung für das LSN (Abbildung 5-1). Die Punkte in Genf (CERN) und im Felslabor Mont Terri kamen später als Ergänzung dazu.

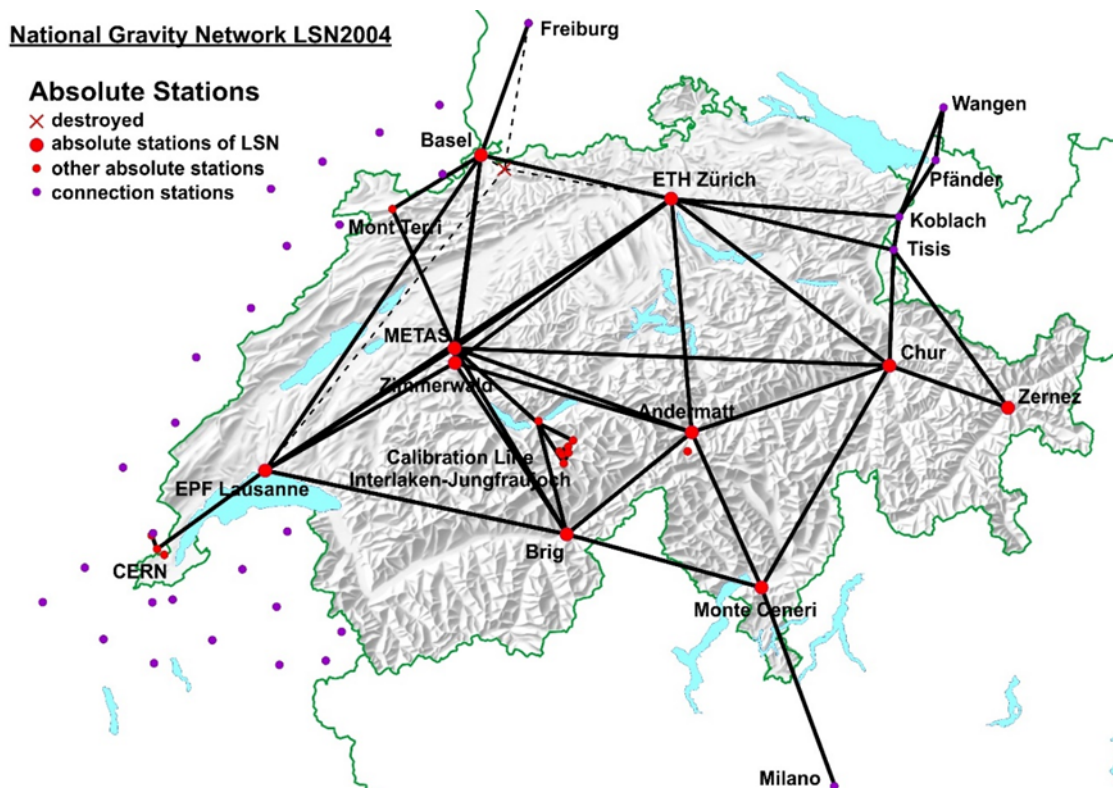


Abbildung 5-1: Netz 0. Ordnung und weitere Absolutstationen des LSN

Da das Absolutgravimeter nicht feldtauglich ist, wurden alle Absolutstationen in öffentlichen Gebäuden eingerichtet. Für die leichte Benutzbarkeit der Punkte wurden sie durch jederzeit zugängliche Exzentren im Freien ergänzt, welche nur durch Relativmessungen beobachtet werden.

Als Auswahlkriterien für Absolutstationen gelten die folgenden Punkte:

- Langzeiterhaltbarkeit des Punktes (Militäranlagen, Luftschuttkeller, Kirchen bevorzugt)
- stabile Aufstellung auf ebenem Boden im untersten Stockwerk
- erschütterungsfrei; möglichst entfernt von starkem Verkehr (Strassen, Tram, Bahn)
- genügend Platz für die Aufstellung (mindestens 3x3 Meter)

- trockenes Raumklima mit einer Temperatur von mindestens 15°C
- Raum möglichst abschliessbar und mit stabilem Stromanschluss
- gut mit dem Auto erreichbar und keine engen Durchgänge (Materialtransport)
- Anschlussmöglichkeit an das Landesnivellement
- möglichst keine saisonalen Schwereänderungen (ausserhalb der Grundwasserzone, nicht an Gewässern mit stark schwankendem Wasserstand)

Der Standort der absoluten Schweremessung wird mit einer Niete versichert, welche ins Nivellementverzeichnis entweder als Haupt- oder als Hilfspunkt aufgenommen wird. Zur besseren Erhaltbarkeit des Punktes wird in der Nähe eine Aloxid-Tafel (Abbildung 5-2) angebracht (deutsch, französisch oder italienisch), welche die Bedeutung des Punktes kurz erklärt. Auch die Exzentren werden mit Nieten markiert und ins Nivellementverzeichnis aufgenommen.

Die Punkte 0. Ordnung werden untereinander direkt durch relative Schweremessungen verbunden, was eine separate Berechnung dieses Teilnetzes ermöglicht.

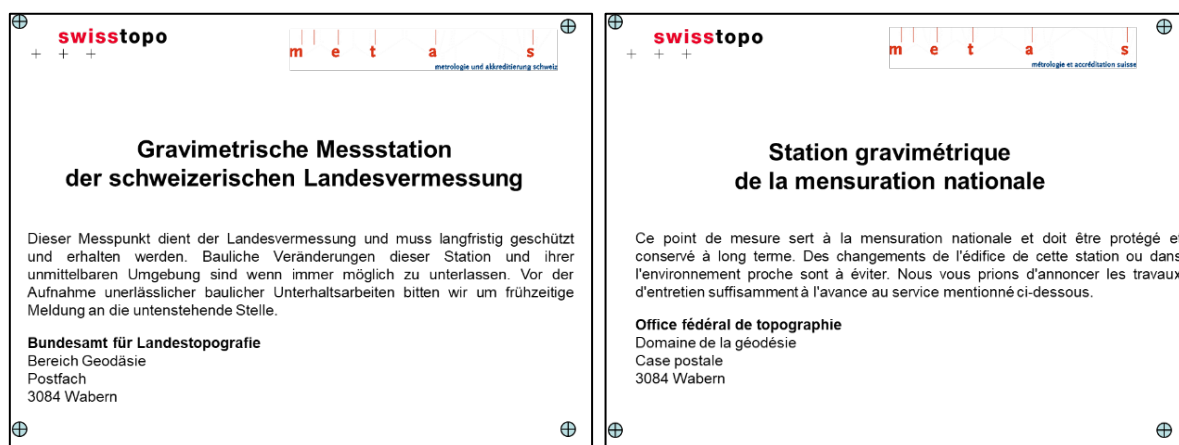


Abbildung 5-2: Aloxid-Tafeln zum Schutz der Absolutstationen (deutsch und französisch)

5.3.2 Kalibrationslinie Interlaken–Jungfrauoch

Eine Kalibrationslinie (oder Eichstrecke) dient zur Überprüfung der Skalenfaktoren von Relativgravimetern. Sie muss aus mindestens 2 Absolutstationen mit möglichst grossem Schwereunterschied bestehen. Am einfachsten ist dies durch einen grossen Höhenunterschied der Stationen zu erreichen. Die Punkte der Gravimeter-Kalibrationslinie Interlaken–Jungfrauoch sind hier nur kurz beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung ist in [Marti, 2017] zu finden.

Die Eichstrecke wurde in den Jahren 2010–2015 neu eingerichtet und besteht aus sieben Absolutstationen in Interlaken, Grindelwald, Alpiglen, auf der Kleinen Scheidegg, bei den Bahnstationen Eigergletscher und Eigerwand sowie in der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch. Der gesamte Schwereunterschied beträgt mehr als 600 mGal. Die Stationen sind alle mit dem Auto oder der Bahn ganzjährig anfahr- und stationierbar. Messkampagnen zur Bestimmung der Skalenfaktoren von Relativgravimetern fanden bisher wie folgt statt: im 2013 (3 Gravimeter: CG-5 von ETHZ/swisstopo, ZLS Burris der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (BAdW), LCR des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts DGFI), im 2016 (1 Gravimeter: CG-5 von ETHZ/swisstopo), im 2017 (5 Gravimeter: 4 CG-5 von ETHZ/swisstopo, Uni Lausanne, Uni Neuchâtel und RBR, sowie das ZLS Burris der BAdW), im 2020 (2 Gravimeter: CG-5 von ETHZ/swisstopo, CG-6 von swisstopo) und im 2022 (4 Gravimeter: je 2 CG-5 und CG-6 von swisstopo und Uni Lausanne).

Die Punkte der Kalibrationslinie sind Bestandteil des LSN-Netzes 0. Ordnung; demnach ist eine Wiederholung der Absolutmessungen alle 10 Jahre vorgesehen.

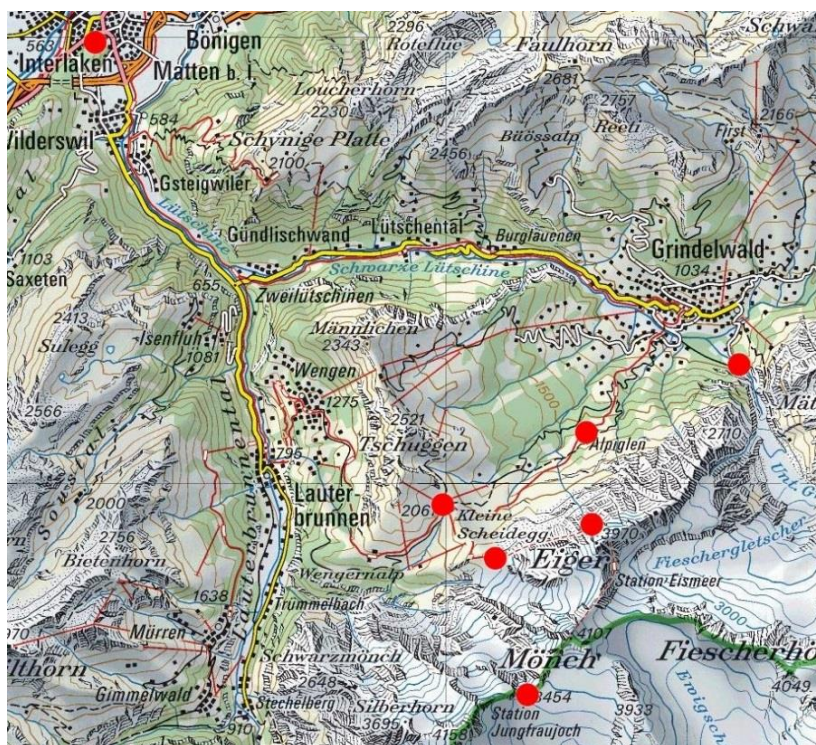


Abbildung 5-3: Absolutstationen der Eichstrecke Interlaken - Jungfrauoch

5.3.3 Netz 1. Ordnung

Die Punkte 1. Ordnung wurden vom SG95 übernommen. Anpassungen waren nur dort vorgesehen, wo der Punkt zerstört wurde oder sich die Stabilität als ungenügend erwies. Das Netz 1. Ordnung im SG95 bestand aus 17 gut stationierbaren Punkten. Davon waren fünf LV95-Hauptpunkte (vier davon ans LHN angeschlossen) und 12 HFP. Auf fünf dieser HFP (Payerne, Porrentruy, Biel, Altdorf, Weinfelden) kann das Gravimeter nicht zentrisch stationiert werden. In diesen Fällen wurde ein dauerhafter (nicht vermarkter) Gravimeterstandort festgelegt, welcher auch in den Punktprotokollen beschrieben ist.

Gegenüber dem SG95 gab es für das LSN2004 folgende Veränderungen: Der Punkt in Basel (ursprünglich Nr. 1008 im LSN) wurde als Exzentrum der Absolutstation Basel (Nr. 0005) gewählt und ist somit heute ein Punkt 0. Ordnung (0005.1). Der Punkt in Montlingen (Basisende Süd der Basis Heerbrugg, Punktnummer 1017 im LSN) wurde zerstört. Aufgrund der Nähe zur österreichischen Absolutstation in Koblach wurde auf einen Ersatz verzichtet. Die Punktnummer 1009 war für einen Punkt in Ringgenberg reserviert; weil dieser Punkt jedoch äusserst schlecht stationierbar ist, wurde er wieder aus dem Verzeichnis der Punkte 1. Ordnung entfernt (er ist heute ein Punkt 2. Ordnung mit der Nummer 2029). Der Punkt in Aarburg (Nr. 1019) wurde 2011 als Ergänzung aufgenommen, da in dieser Region alle Punkte 2. Ordnung eher schlecht zugänglich sind.

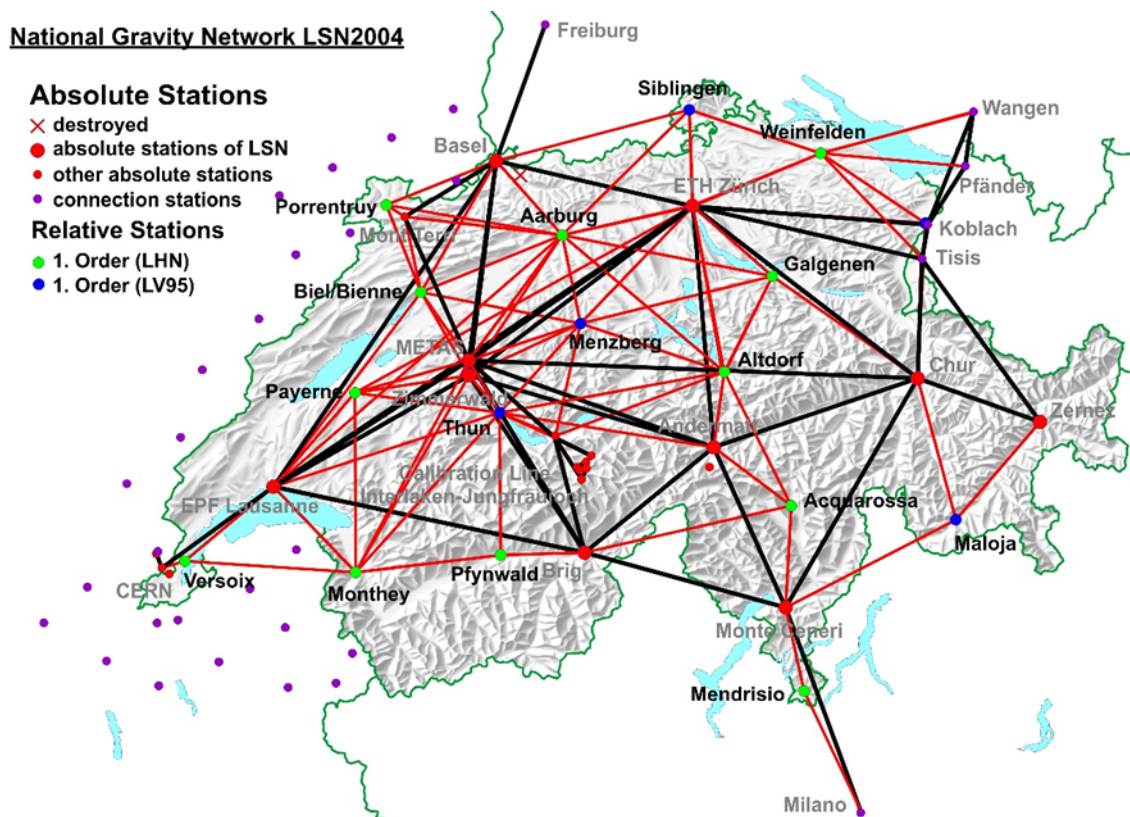


Abbildung 5-4: Netz 0. und 1. Ordnung des LSN

5.3.4 Netz 2. Ordnung

Das Netz 2. Ordnung wurde vollständig aus dem SG95 übernommen. Es wird im Wesentlichen durch die ca. 100 LV95-Hauptpunkte gebildet. Ergänzt wurde es noch durch die beiden Verbindungspunkte zum österreichischen Schwerenetz in St.Margrethen und in Vinadi. Später wurden auch noch die vier Punkte der Kalibrationslinie der Uni Lausanne am Mollendruz und ein Punkt auf dem Ofenpass (als Ergänzung zum eher instabilen Punkt in Santa Maria) hinzugefügt.

Der wesentliche Unterschied zwischen Punkten 1. und 2. Ordnung besteht vor allem darin, dass die Punkte erster Ordnung tendenziell öfter beobachtet werden und deshalb auch eine bessere Genauigkeit aufweisen.

Das LV95-Netz wurde natürlich in erster Linie für GNSS-Messungen konzipiert. Deshalb sind nicht alle Punkte ideal für Gravimetrie. Einige Punkte im Fels (z.B. St.Triphon, Sargans, Oberalp) haben einen sehr unruhigen Untergrund und das Gravimeter lässt sich nur schwierig horizontieren. Einige Punkte (z.B. Travers, Fribourg, Goldach) liegen auf Wasserreservoirs und Schwereänderungen aufgrund des Füllstandes sind nicht ausgeschlossen. Bei anderen Punkten (z.B. Engstligenalp, Ramosch) ist wegen der nötigen GNSS-Sichtbarkeit der Anfahrweg eher lang, so dass der Punkt wohl eher selten als Anschlusspunkt für lokale Gravimetrie-Kampagnen verwendet werden dürfte. Auch die Punkte in einem Schacht sind mit dem Gravimeter eher schwierig zu messen.

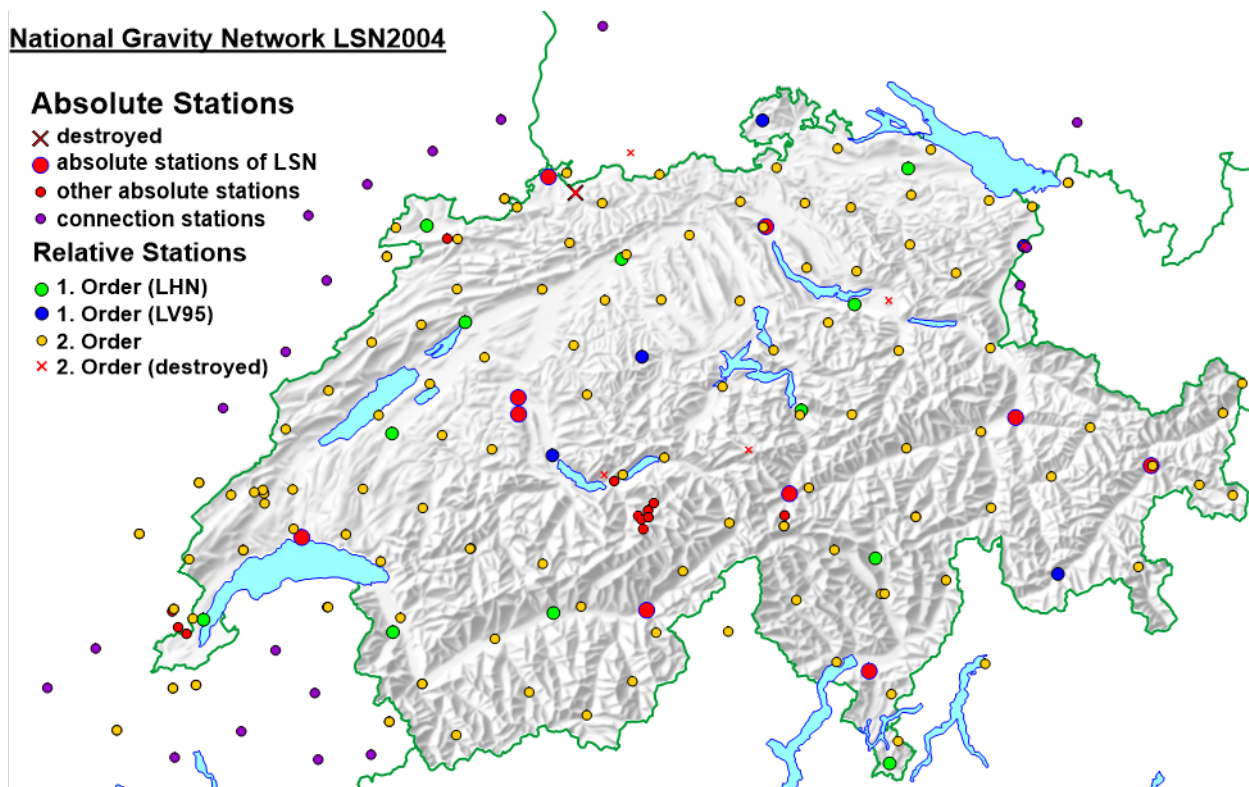


Abbildung 5-5: LSN 0. bis 2. Ordnung

5.3.5 Verdichtungsnetz 3. Ordnung

Als Netz 3. Ordnung wurde im ursprünglichen Konzept des LSN [Marti und Schneider, 2005] die Gesamtheit aller für das LHN durchgeführten Schweremessungen vorgesehen. Dies wurde aber später geändert, indem nur noch Punkte, welche in der Gesamtausgleichung enthalten sind, als Teil des LSN verstanden wurden. Dies führte dazu, dass nur noch einige wenige dieser HFP ins LSN als Punkte 3. Ordnung aufgenommen wurden. Es waren dies insbesondere Punkte, welche schon in früheren Schwerenetzen enthalten waren.

Es bestand aber auch das generelle Bedürfnis, das LSN besser mit den alten Schwerenetzen (SGN53, SNGN83) zu verknüpfen, um systematische Unterschiede oder auch Schwereänderungen festzustellen. Deshalb wurde ab 2015 damit begonnen, alle noch bestehenden alten Punkte ins LSN zu integrieren. Bis heute sind dies etwa 250 Punkte, welche das LSN 3. Ordnung bilden. Neben den Punkten der alten Schwerenetze wurden auch einige zusätzliche LV95-Verdichtungspunkte beobachtet, welche in einigen Gegenden als Anschlusspunkte für lokale Messkampagnen dienen können. Die Integration alter Punkte ins LSN ist noch nicht ganz abgeschlossen. Insbesondere im Tessin gibt es einige Punkte, welche noch ins LSN aufgenommen werden sollen.

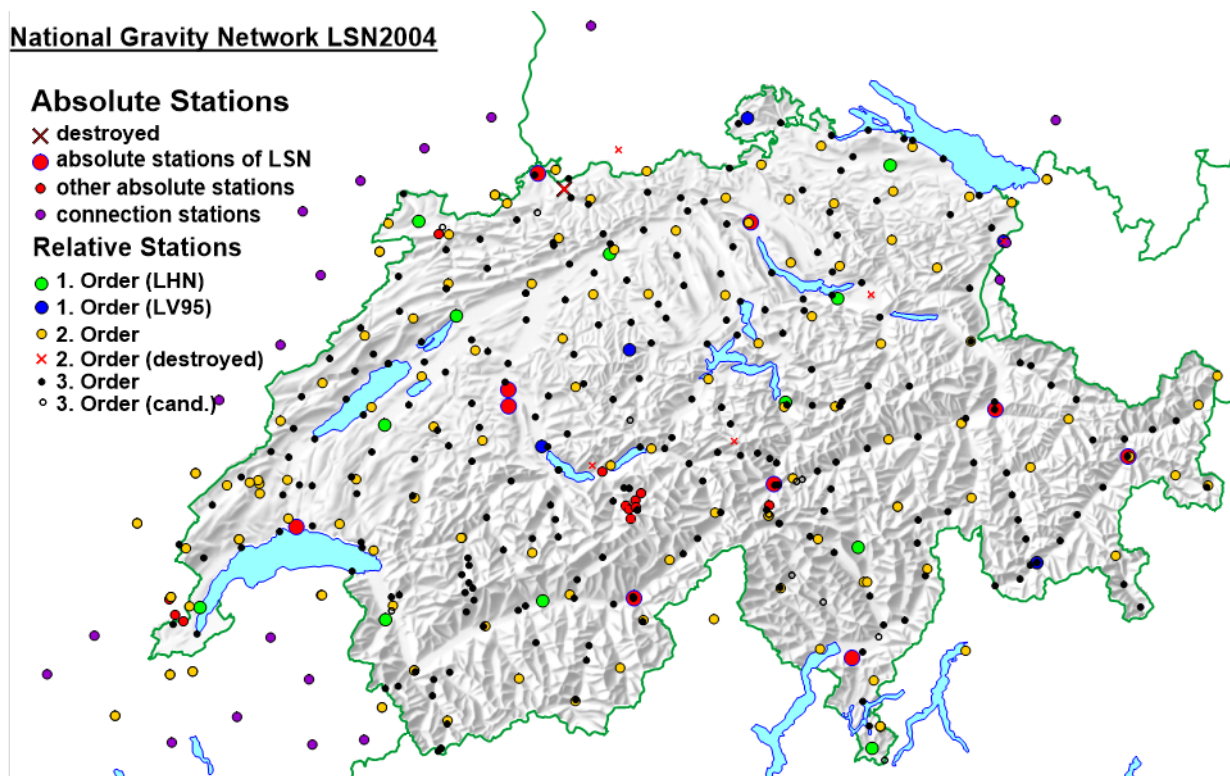


Abbildung 5-6: LSN 0. bis 3. Ordnung

5.4 Punktnummerierung

In den ersten Schwerenetzen der Schweiz (SGN53, REUN, Testschleife, Netz 1. Ordnung) wurden die Punkte jeweils einfach durchnummeriert, wobei mit «1» gestartet wurde. Beim SKN68 wurde ein vom BGI (1963, revidiert 1967) vorgeschlagenes System für die Nummerierung der Punkte auch in der Schweiz eingeführt. Bei diesem System wurde die ganze Erde in 648 $10^\circ \times 10^\circ$ -Blöcke eingeteilt. Diese Blocknummer ergab die ersten drei Stellen der Punktnummer. Für die Schweiz liegen alle Punkte westlich von 10° Ost im Block 180 und alle östlich von 10° im Block 179. Dieses Nummerierungssystem ist aber bei der grossen Menge von heute vorhandenen Schweremessungen nicht mehr praktikabel.

Deshalb musste für das LSN eine eigene Punktnummerierung eingeführt werden. Diese ist prinzipiell vierstellig. Die erste Ziffer bezeichnet dabei die 0. bis 3. Ordnung. Punkte ohne Bedeutung für das LSN, welche aber aus unterschiedlichen Gründen trotzdem im LSN enthalten sind (z.B. temporäre Punkte), beginnen mit einer «4». Exzentren erhalten dieselbe Nummer wie der Hauptpunkt mit einem durch einen Punkt abgetrennten Zusatz. Auch neu gemessene Punkte als Ersatz für einen zerstörten Punkt erhalten einen solchen Zusatz.

Zusätzlich zur Nummer erhalten die Punkte des LSN einen eindeutigen Namen (Ortsbezeichnung), und die Identität mit einem HFP oder LFP wird ebenfalls verwaltet.

Die Nummern für die Punkte 0. Ordnung wurden relativ zufällig verteilt, wobei tiefere Nummern älteren Punkten entsprechen. Danach wurden die neuen Punkte hinzugefügt. Heute reicht die Nummerierung von 0001 (Zimmerwald) bis 0022 (Eigerwand). Ab Nummer 0030 folgen die Anschlusspunkte an die ausländischen Netze. Der wichtigste Standort der absoluten Schweremessung erhält üblicherweise den Zusatz «.0». Weitere Stationierungen für Absolutmessungen und die Exzentren erhalten dann die Zusätze «.1», «.2» etc. Nummern ohne Zusatz bezeichnen entweder die ganze Punktgruppe oder den HFP, welcher als Referenz für die Schweremessung dient.

Die Punkte 1. Ordnung wurden von Westen nach Osten durchnummeriert. Neue Punkte werden am Schluss dieser Liste ergänzt. So reicht die ursprüngliche Liste der Punkte 1. Ordnung von 1001 (Versoix) bis 1018 (Maloja). Der Punkt 1019 (Aarburg) wurde erst später hinzugefügt. Bei Punkten, auf welchen nicht direkt stationiert werden kann (Payerne, Porrentruy, Biel, Altdorf, Weinfelden) bezeichnet die Nummer ohne Zusatz den HFP und die Nummer mit dem Zusatz «.1» den Gravimeterstandort.

Entsprechend wurden die Punkte 2. Ordnung von Westen nach Osten nummeriert. Die Nummern reichten ursprünglich von 2001 (Bossy) bis 2097 (Santa Maria). Später wurden noch die Punkte 2098 bis 2101 hinzugefügt. Zusätze in den Punktnummern treten hier vor allem bei ersetzten Punkten auf (z.B. ist 2074 der alte LV95-Punkt in Biasca und 2074.1 der neue LV95-Punkt).

Die Nummern der Punkte 3. Ordnung beginnen bei 3001 (Spiez). Die Reihenfolge entspricht dem Zeitpunkt, zu welchem sie ins LSN integriert wurden.

5.5 Dokumentation der Punkte

Die Dokumentation der Punkte erfolgt über die Datenbank der Fixpunkte, dem sogenannten Fixpunkt-Datenservice (FiDa). Dabei werden die Punkte des LSN wie Höhenfixpunkte (HFP) behandelt. Dies erspart die Generierung eines speziellen Protokolls für die Schwerpunkte und somit auch eine separate Nachführung. Allerdings sind nicht alle Punkte des LSN ans Landesnivellement angeschlossen und somit auch keine HFP. Dies wurde so gelöst, dass jeder nicht am Nivellement angeschlossene LSN-Punkt auch als HFP1-Hilfspunkt definiert wurde.

Auf den Punktprotokollen der LSN-Punkte ist neben den üblichen Angaben der HFP auch der Schwerwert und das Jahr der letzten Schwerermessung angegeben. Bei exzentrisch zu stationierenden Punkten sind auch Angaben (Text, Kroki, Foto) zum Gravimeterstandort enthalten.


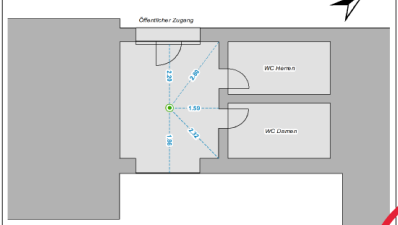
HFP1 E = 2 634 807.707 N = 1 241 170.724 H _W = 398.389 Genauigkeit (1σ) Lage = 0.100 m Höhe = 0.003 m Zuverlässigkeit erfüllt Lage = Ja Höhe = Ja LK AG 1108 AG 471 NIdent.: CH0200000AG	HFP E = 2 643 161.024 N = 1 161 132.625 H _W = 1615.970 Genauigkeit (1σ) Lage = 0.100 m Höhe = 0.100 m Zuverlässigkeit erfüllt Lage = Ja Höhe = Ja LK BE 1229 BE 1161 NIdent.: CH0200000BEO																																	
Kirchgasse 1, altes Pfarrhaus, Fundamentfels links vom Eingang, auf Höhe der zweituntersten Treppenstufe, 0.45 m über Pflasterung	Bahnstation Alpiglen, im Betonboden des Vorraums der öffentlichen Toilettenanlage																																	
																																		
Kennzeichnung T3V Bronzeschild L+T, vertikal Inschrift 117 Bemerkung	Kennzeichnung T0V Niete L+T, vertikal Inschrift GRAV Bemerkung																																	
<table border="1"> <tr><td>Punkt LSN</td><td>1019</td></tr> <tr><td>1.Ordnung</td><td></td></tr> <tr><td>Schwerwert</td><td>980661 899</td></tr> <tr><td>Schwerermessung</td><td>2021</td></tr> </table>	Punkt LSN	1019	1.Ordnung		Schwerwert	980661 899	Schwerermessung	2021	<table border="1"> <tr><td>Punkt LSN</td><td>0018.0</td></tr> <tr><td>Absolutstation</td><td></td></tr> <tr><td>Schwerwert</td><td>980283 389</td></tr> <tr><td>Schwerermessung</td><td>2020</td></tr> </table>	Punkt LSN	0018.0	Absolutstation		Schwerwert	980283 389	Schwerermessung	2020																	
Punkt LSN	1019																																	
1.Ordnung																																		
Schwerwert	980661 899																																	
Schwerermessung	2021																																	
Punkt LSN	0018.0																																	
Absolutstation																																		
Schwerwert	980283 389																																	
Schwerermessung	2020																																	
Nachführung <table border="1"> <thead> <tr><th>Herkunft</th><th>Datum</th><th></th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>LN</td><td>1969</td><td>Kote unverändert seit 1907</td></tr> <tr><td>LN</td><td>1973</td><td>Kote unverändert seit 1969</td></tr> <tr><td>LN</td><td>1991</td><td>Kote unverändert seit 1973</td></tr> <tr><td>L+T</td><td>1996</td><td>Neueinstellung Verzeichnis LNV</td></tr> <tr><td>LN</td><td>2011</td><td>Kote unverändert seit 1991</td></tr> <tr><td>L+T</td><td>2011</td><td>Koordinaten AV</td></tr> <tr><td>L+T</td><td>2014</td><td>Punkt in Ordnung</td></tr> <tr><td>LN</td><td>2016</td><td>Kote unverändert seit 2011</td></tr> </tbody> </table>	Herkunft	Datum		LN	1969	Kote unverändert seit 1907	LN	1973	Kote unverändert seit 1969	LN	1991	Kote unverändert seit 1973	L+T	1996	Neueinstellung Verzeichnis LNV	LN	2011	Kote unverändert seit 1991	L+T	2011	Koordinaten AV	L+T	2014	Punkt in Ordnung	LN	2016	Kote unverändert seit 2011	Nachführung <table border="1"> <thead> <tr><th>Herkunft</th><th>Datum</th><th></th></tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Herkunft	Datum				
Herkunft	Datum																																	
LN	1969	Kote unverändert seit 1907																																
LN	1973	Kote unverändert seit 1969																																
LN	1991	Kote unverändert seit 1973																																
L+T	1996	Neueinstellung Verzeichnis LNV																																
LN	2011	Kote unverändert seit 1991																																
L+T	2011	Koordinaten AV																																
L+T	2014	Punkt in Ordnung																																
LN	2016	Kote unverändert seit 2011																																
Herkunft	Datum																																	
Kt AG Bezirk Zofingen Gemeinde Aarburg Ortsbezeichnung Aarburg	Kt BE Bezirk Interlaken-Oberhasli Gemeinde Grindelwald Ortsbezeichnung Alpiglen																																	
Erstellung LN 1907 Identität Id. mit Ord.Nr. 609, Ausgabe 1941 Repère Pierre du Niton 373.600 m.u.M.	Erstellung L+T 2013 Neupunkt Identität Repère Pierre du Niton 373.600 m.u.M.																																	
Bundesamt für Landestopografie swisstopo																																		

Abbildung 5-7: Beispiel zweier Punktprotokolle von LSN-Punkten. Links: Punkt 1. Ordnung Aarburg mit exzentrischer Aufstellung. Rechts: Absolutstation Alpiglen, welche nicht ans Landesnivellement angeschlossen ist.

Publiziert und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden die LSN-Punkte mit ihren aktuellen Angaben in erster Linie über map.geo.admin.ch auf der Ebene «Schweregrundnetz» (siehe Abbildung 5-8) und über regelmässig aktualisierte Punktlisten (siehe Beispiele in den Anhängen).

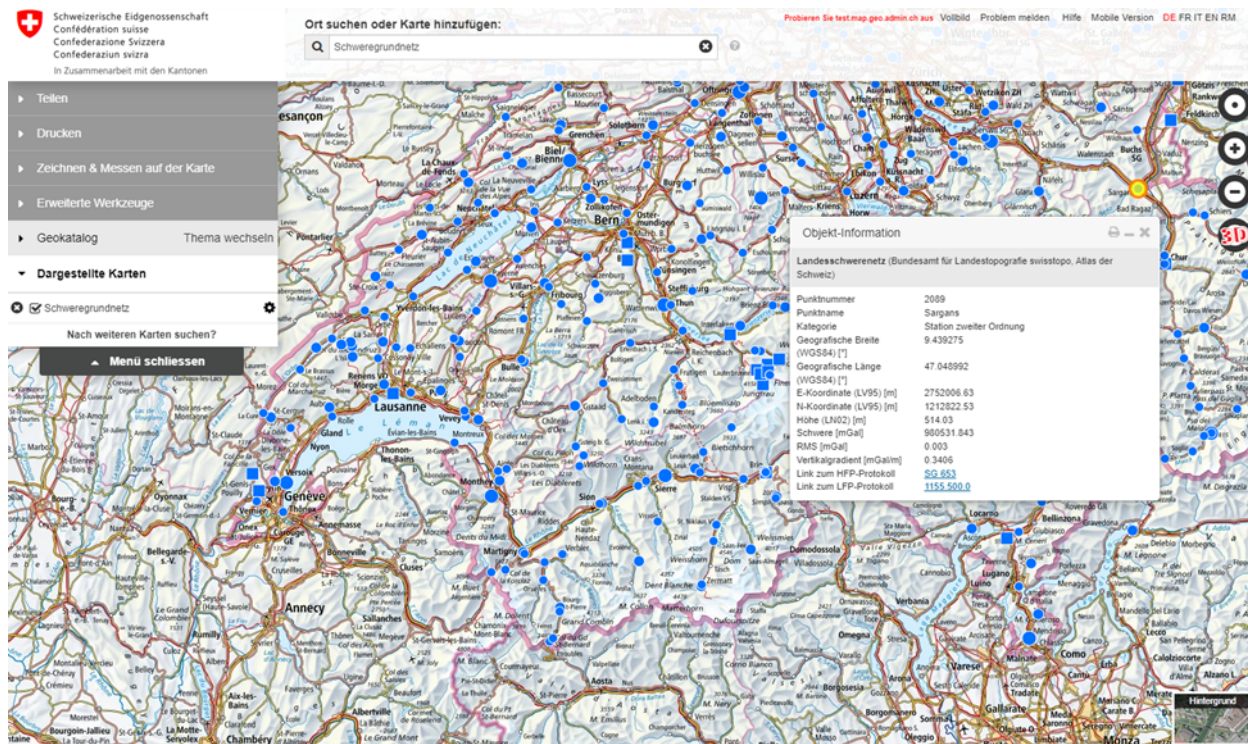


Abbildung 5-8: Darstellung auf map.geo.admin.ch mit den Objekt-Informationen zur Station 2. Ordnung 2089 «Sargans».

6 Spezifikationen und Standards

Der Unterhalt des LSN ist eine permanente Aufgabe von swisstopo. Die gravimetrischen Neumessungen im LSN erfolgen im Rahmen der Landesvermessung. Die Absolutmessungen werden in der Regel durch das METAS im Auftrag und mit Unterstützung von swisstopo durchgeführt. Für die Relativmessungen werden Beobachter von swisstopo sowie kalibrierte Gravimeter eingesetzt. Die wichtigsten Standards sind im «Nachführungskonzept der Landesvermessung» [swisstopo, 2020] und in den «Qualitätsstandards der Landesvermessung» (jährlich nachgeführt) aufgeführt.

6.1 Absolute Schweremessungen

Für die Durchführung der absoluten Schweremessungen wurde 2005 mit dem METAS eine Dienstleistungsvereinbarung abgeschlossen, welche die möglichst jährliche Messung der Station Zimmerwald sowie das Messen einer weiteren Absolutstation des LSN pro Jahr vorsieht. Zudem sollte im Labor des METAS ca. jeden Monat eine Messung erfolgen, um Unregelmässigkeiten im Betrieb des Instruments und saisonale und langzeitliche Schwereänderungen zu detektieren.

Dies führt zur Formulierung des Ziels, dass die Station Zimmerwald jährlich und alle übrigen Stationen des LSN alle 10 Jahre beobachtet werden.

Um das korrekte Funktionieren des Instruments zu garantieren, nimmt das METAS an den regelmässig stattfindenden internationalen Vergleichskampagnen von Absolutgravimetern teil. Die dabei erzielten Resultate sind in den entsprechenden Reports des BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) dokumentiert.

Als Ziel für die Genauigkeit einer Absolutmessung wird eine Standardabweichung von 3 μGal auf Instrumentenhöhe vorgegeben (erweiterte Messunsicherheit von 6 μGal). Als Richtlinie zur Erreichung dieses Ziels sind 24 Messreihen à 100 Drops (= einzelner Freifallversuch) nötig.

Für die Genauigkeit des auf den Boden (Messpunkt) reduzierten Schwerewerts wird eine Standardabweichung von 4 μGal vorgegeben. Um dieses hohe Ziel zu erreichen, muss der Vertikalgradient auf den Stationen mit höchster Genauigkeit (ca. 1 $\mu\text{Gal}/\text{m}$) gemessen werden.

Für jede Absolutmessung wird vom METAS ein kurzer Messbericht (Zertifikat) erstellt, welcher die wesentlichen Elemente zur Messung und Auswertung enthält. Die Resultate der Messungen werden an die internationale Datenbank der Absolutmessungen (AGRAV) übermittelt.

In der Gesamtausgleichung sollen die Absolutstationen und deren Exzentren eine Standardabweichung von besser als 3 μGal aufweisen. Dazu sind auch zahlreiche hochgenaue Relativmessungen zwischen den Absolutstationen und zwischen den Absolutstationen und deren Exzentren erforderlich.

6.2 Relative Schweremessungen

Für die relativen Schweremessungen im LSN sind kalibrierte Gravimeter zu verwenden, deren Skalenfaktor gut bekannt ist und die möglichst auch für die Einflüsse von Neigung, Sensortemperatur und Drift korrigiert sind. Der Skalenfaktor ist jährlich zu überprüfen und die Neigungs- und Driftkalibration ist vor jeder grösseren Messkampagne durchzuführen. Die Messdauer auf einer Station hängt stark von der Umgebung (Erschütterungen) ab. Sie sollte aber mindestens so lange sein, dass Hysteresis-Effekte (Drifts der Ablesung nach einem Transport) nur noch eine kleine Rolle spielen. Das heisst, dass in den letzten Messungen einer Station kein deutlicher Trend mehr sichtbar sein darf.

Relativmessungen sollen, wenn immer möglich, in geschlossenen Schleifen mit einer maximalen Dauer von einem Tag (<12 Stunden) erfolgen. Falls dies nicht möglich ist, sollen die Messungen auf Punkten mit gut bekannter Schwere begonnen und abgeschlossen werden. Die Messung von Vertikalgradienten auf Relativ-Punkten ist nicht zwingend, aber falls möglich durchzuführen.

Stationen 0. und 1. Ordnung sollen mindestens alle fünf Jahre gemessen werden, Punkte 2. Ordnung alle 10 Jahre. Für die Wiederholung der Punkte 3. Ordnung werden keine Vorgaben gemacht.

Als Genauigkeit der ausgeglichenen Punkte 1. Ordnung ist eine Standardabweichung von besser als 5 μGal anzustreben. Das Ziel bei Punkten 2. Ordnung liegt bei 8 μGal und bei den Punkten 3. Ordnung bei 15 μGal .

6.3 Höhen und Lagekoordinaten

Die Stationen des LSN erhalten einen genauen und zuverlässigen Höhenbezug relativ zu den Bezugsrahmen LHN95 und/oder LN02. Ausnahmen davon sind aber möglich (z.B. für die Punkte der Kalibrationslinie Jungfrauoch). Die Anschlussmessungen erfolgen nach den Spezifikationen des Landesnivellements und die Punkte sind als Haupt- oder Hilfspunkte ins Nivellementverzeichnis zu übernehmen.

Die Lagekoordinaten der Messpunkte werden im Bezugsrahmen LV95 bestimmt. Eine Genauigkeit von einigen wenigen cm ist dabei anzustreben. Für die meisten Punkte können dazu RTK-Messungen durchgeführt werden. Punkte in Gebäuden werden durch einfache Polygonzüge oder andere geeignete Methoden angeschlossen. Die Lage der unterirdischen Punkte wird zudem durch charakteristische Vermessungen zusätzlich festgelegt.

6.4 Dokumentation, Unterhalt und Nachführung

Das wesentlichste Instrument zur Dokumentation der Resultate des LSN ist die Datenbank der Fixpunkte der Landesvermessung, der Fixpunkt-Datenservice (FiDa). Dort werden die Punkte verwaltet und die Schwerewerte gespeichert (siehe Kapitel 5.5). Daneben gibt es Punktlisten (siehe Anhänge A1, A2, A3), welche mindestens jährlich nachgeführt werden und auf der swisstopo Webseite abrufbar sind. Die aktuellsten Schwerewerte sind zudem auf den Punktprotokollen ersichtlich, welche über map.geo.admin.ch publiziert werden.

Die Absolutmessungen sind in den Messberichten des METAS dokumentiert und können auch über die internationale Datenbank AGRAV [Wilmes et. al., 2009] abgerufen werden.

Bei neu eingerichteten Absolutstationen wird ein swisstopo-Report erstellt, welcher neben der gravimetrischen Erstmessung auch die Einzelheiten zur Punktbeschreibung, zum Anschluss an das Höhennetz und zur Koordinatenbestimmung enthält.

Die Relativmessungen werden nur in den Protokoll-Files der Auswertung des LSN dokumentiert. Die Rohdaten und die für die Ausgleichung aufbereiteten Daten sind jedoch aufzubewahren.

Für den Unterhalt und die Nachführung verweisen wir auf das Dokument «Nachführungskonzept der Landesvermessung» [swisstopo, 2020].

7 Kategorisieren von Punkten

Die Punkte des LSN können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden. Verschiedene Charakteristiken sind im Folgenden kurz beschrieben und im Anhang A1 für jeden Punkt aufgelistet.

7.1 Ordnung

Die hierarchische Einteilung in verschiedene Punktordnungen hat vor allem historische Gründe. Eigentlich hat nur die Unterscheidung zwischen Absolut- und Relativstationen eine grössere Bedeutung. Die 0. Ordnung des LSN wird durch jene Punkte gebildet, die mit einem Absolutgravimeter höchster Präzision (FG5-X) stationierbar sind; diese liegen demnach wegen der nötigen Stromversorgung und dem Witterungsschutz im Innern von Gebäuden. Ebenfalls zur 0. Ordnung werden die Exzentren der Absolutstationen gezählt. Diese liegen in unmittelbarer Nähe zur Hauptstation und sind ohne Schlüssel oder Voranmeldung zumindest während den Bürozeiten frei zugänglich. Falls möglich, sollen die Exzentren einfach stationierbar sein. Auch die Anschlusspunkte an die Schwerenetze der Nachbarländer sind Bestandteil des Netzes 0. Ordnung.

Das Netz 1. Ordnung wird aktuell durch 16 Punkte gebildet. Es sind dies stabile und gut stationierbare Punkte, welche eine erste, ziemlich homogene Verdichtung des Netzes 0. Ordnung bilden. 4 dieser Punkte sind identisch mit LV95-Hauptpunkten, einer davon (Menzberg) ist nicht ans Landesnivellement angeschlossen. Die übrigen 12 Punkte sind Höhenfixpunkte (HFP1), ausser dem Punkt in Acquarossa, welcher nur ein HFP-Hilfspunkt ist. Auf sechs dieser Punkte lässt sich das Gravimeter zentrisch stationieren (vertikale Versicherung, Punkttypen T1V, D1V oder T4V). Die übrigen sechs Punkte müssen exzentrisch stationiert werden, wobei der exakte Gravimeterstandort in den Punktprotokollen vermerkt ist. Wegen dem häufigen Besuch der Stationen 1. Ordnung erreichen sie in der Ausgleichung eine tendenziell bessere Genauigkeit als die Punkte 2. Ordnung.

Das Netz 2. Ordnung wird im Wesentlichen durch die ca. 100 LV95-Hauptpunkte gebildet. Die Stationierung auf diesen Punkten ist überall zentrisch möglich. Ergänzt wird das Netz 2. Ordnung durch die beiden Anschlusspunkte ans österreichische Netz in St. Margrethen und Vinadi, sowie durch die vier Punkte der Eichstrecke Mollendruz der Uni Lausanne, welche HFP2 des Kantons Waadt sind. Auf diesen Punkten muss exzentrisch stationiert werden.

Das Netz 3. Ordnung ist eine weitere Verdichtung, welche vor allem durch HFP1 und HFP2 gebildet wird. Die allermeisten dieser Punkte waren schon in älteren Schwerenetzen enthalten und ermöglichen somit eine Verknüpfung und Transformation von älteren Schweredaten. In Gegenden, in welchen keine HFP1 oder HFP2 vorhanden sind, wurden vorzugsweise LV95-Verdichtungspunkte als Ergänzung des Netzes 3. Ordnung gewählt.

7.2 Identität mit LFP/HFP

Die allermeisten Punkte des LSN sind identisch mit LFP oder HFP. Wenn möglich, wurden LFP1 und HFP1 gewählt. In einigen Gegenden mussten aber auch HFP2 oder auch LFP2 gewählt werden. Die wenigen Punkte, welche nicht identisch mit einem FP sind, erhielten für Dokumentationszwecke eine Zuordnung als HFP1-Hilfspunkt, auch wenn diese nicht ans Landesnivellement angeschlossen wurden.

7.3 Stationierbarkeit

Bei der Stationierbarkeit ist ein erster Unterschied, ob zentrisch oder exzentrisch aufgestellt wird. Eine exzentrische Aufstellung ist vor allem bei horizontal gesetzten HFP nötig. Falls nicht in den Punktprotokollen explizit erwähnt, so ist der Gravimeterstandort direkt vor dem HFP.

Bei horizontal versetzten HFP ist es öfters der Fall, dass der Bodenbelag direkt unterhalb für eine Gravimeterstationierung schlecht geeignet ist (Gras, grosse Steine, Bepflanzung, schräger Boden, ...).

Bei zentrischer Aufstellung ist das Problem manchmal, dass der Boden uneben oder geneigt ist und somit das Gravimeter nicht, oder nur mit Mühe mit dem kleinen Stativ horizontaliert werden kann. Die Lösung ist in diesem Fall, dass mit dem höheren Schiebebeinstativ gemessen werden muss, was die Stabilität beeinträchtigt, den Zeitaufwand erhöht und wegen der grösseren Instrumentenhöhe und Unsicherheiten im

Vertikalgradienten auch das Resultat verschlechtert. Beim CG-6 hat sich dieses Problem noch verschärft, da der Horizontierbereich des Stativs gegenüber dem CG-5 noch weiter verkleinert wurde.

Einige Punkte sind nicht immer zugänglich, da sie manchmal durch Fahrzeuge oder Warendepots verstellt sind. Dies ist des Öfteren auf Punkten auf Parkplätzen der Fall. Dies bedeutet dann eine längere Wartezeit, eine Aufräumaktion oder eine exzentrische Aufstellung.

Punkte in Schächten sind nicht ideal für Schweremessungen. Bei einem Schacht von weniger als 40 cm Durchmesser lässt sich das kleine Gravimeterstativ nicht im Schacht platzieren. Ab 40 cm geht es knapp, das Horizontieren ist aber eher mühsam. Die Alternative ist dann, das hohe Stativ zu verwenden oder das kleine Stativ auf dem Schachtdeckel zu platzieren. Das funktioniert recht gut, allerdings wird das Messen der Instrumentenhöhe dadurch erschwert. Ein weiteres Problem mit einigen Schachtpunkten ist auch, dass sie von Kies oder Erde bedeckt sein können. Die Punkte müssen dann zunächst gefunden und ausgegraben werden.

7.4 Zufahrt

Idealerweise kann zu einem Punkt des LSN direkt zugefahren werden, um den Zeitverlust zu verringern. Dies ist allerdings nicht immer der Fall. Für einige Punkte in abgelegenen Gegenden sind längere Anfahrten auf Feldwegen nötig, eine Seilbahn muss benutzt werden oder ein kleiner Fussmarsch ist vorausgesetzt. Solche Punkte werden wohl kaum sehr oft beobachtet werden. Andere Punkte liegen in durch Schranken oder Toren gesicherten Arealen und es muss zunächst ein Schlüssel organisiert oder auf die Öffnungszeiten geachtet werden.

7.5 Stabilität

Hier muss zwischen der Kurzzeit- und der Langzeitstabilität unterschieden werden. Die Kurzzeit-Stabilität beeinflusst das Verhalten des Gravimeters während der Messung. Störungen werden vor allem durch lokale Erschütterungen verursacht, welche meist vom Strassen- oder Eisenbahnverkehr kommen. Auf solchen Punkten muss meist länger beobachtet werden, bis genügend gute Messungen vorhanden sind. Weitere Störungen können von lokal instabilem Untergrund verursacht werden. Dort hilft meist, sich während den Messungen dem Gravimeter nicht zu nähern und sich ruhig zu verhalten. Bei vielen Punkten bei Kirchen ist während dem Läuten der Glocken keine Messung möglich.

Die Langzeitstabilität der Schwere ist auf einigen Punkten durch Schwankungen des Grundwasserspiegels beeinträchtigt. Die einzelnen Messungen sehen dort dann zwar gut aus, aber bei einem erneuten Besuch der Station wird ein anderer Schwerewert erhalten. Dies trifft auch auf Punkte zu, welche in der Nähe von Gewässern mit veränderlichem Wasserspiegel liegen (Stauseen, Beispiel Zervreilasee). Falls möglich, kann in solchen Fällen der Einfluss der veränderlichen Wassermassen mit einem Bathymetrie-Modell berücksichtigt werden. Einige Punkte liegen auch in Senkungszonen, wo natürlich auch keine konstante Schwere erwartet werden kann.

8 Durchgeführte Messungen

8.1 Aufbau 2003–2009

Gemäss dem ursprünglichen Konzept von 2003 zur Erneuerung des Schweregrundnetzes sollte in einer ersten Phase das bestehende Schweregrundnetz SG95 durch einige neue Absolutstationen ergänzt und diese durch Relativmessungen untereinander und mit den umliegenden Punkten 1. und 2. Ordnung verbunden werden. Es sollte auch eine bessere Verknüpfung der bestehenden Netze 1. und 2. Ordnung erreicht werden, welche im SG95 eher schwach war. Die Gesamtausgleichung des LSN sollte auch unter Einbezug der alten Messungen für das SG95 erfolgen.

Zu Beginn stand die Messung und die Verbindung der Station Zimmerwald mit der Station am METAS im Vordergrund. Dazu wurden ab Dezember 2003 regelmässige (etwa alle 3–4 Monate) Relativmessungen zwischen Wabern und Zimmerwald durchgeführt. Dabei kamen meist Gravimeter der Uni Lausanne zum Einsatz. Die ersten Absolutmessungen in Zimmerwald erfolgten im März 2004 und im März 2005. Diese Arbeiten sind in [Marti et al. 2005] beschrieben.

In den folgenden Jahren wurden dann die neuen Absolutstationen eingerichtet und gemessen: Brig (2005), Basel (2006), Andermatt (2007) und Zernez (2008).

In demselben Jahr wie die Absolutmessungen fanden auch die Relativmessungen zur Verbindung dieser Stationen mit dem bestehenden Netz statt. Diese jeweils einwöchigen Kampagnen erfolgten 2005–2007 in Zusammenarbeit mit der Uni Lausanne. Dabei wurde in erster Linie deren Scintrex CG-5 eingesetzt, aber zu Beginn wurden zusätzlich auch verschiedene LCR-Gravimeter und das CG-3 eingesetzt, so dass meist mit zwei Gravimetern gleichzeitig gemessen wurde.

Im Oktober 2005 fand die erste Relativ-Kampagne zum Anschluss der Station in Brig statt. Diese wurde mit den Absolutstationen in Zimmerwald, METAS, Lausanne und Monte Ceneri verbunden. Ebenfalls 2005 erfolgte die bessere Verknüpfung der Stationen 1. Ordnung Versoix, Payerne, Monthey, Pfywald und Acquarossa.

Im Juli 2006 erfolgte die Anschlusskampagne für Basel mit Verbindungen zu Lausanne, Freiburg, Zimmerwald, METAS und Zürich. Dazu wurden die Stationen 1. Ordnung Porrentruy, Biel, Menzberg, Altdorf, Galgenen, Siblingen und Weinfeldern besser verknüpft.

Die Anschlusskampagne Andermatt fand im Juni 2007 statt. Die Verbindungen 0. Ordnung erfolgten zu Zimmerwald, METAS, Brig, Monte Ceneri, Milano, Chur und Zürich. Neu verbunden wurde die Station 1. Ordnung in Mendrisio und die Punkte in Altdorf, Acquarossa und Galgenen wurden ein zweites Mal angeschlossen.

Wegen der doch recht hohen Mietkosten des Gravimeters der Uni Lausanne entschieden sich swisstopo und die ETH Zürich 2007, gemeinsam ein eigenes Gravimeter vom Typ Scintrex CG-5 anzuschaffen. Dieses Instrument zeigte aber zu Beginn recht grosse Schwierigkeiten, so dass damit 2008 keine Messungen für das LSN erfolgen konnten und die Anschlusskampagne Zernez auf September 2009 verschoben werden musste. Diese Station wurde mit den Absolutstationen in Zürich, Chur, Tisis und Koblach verbunden und als letzte Station 1. Ordnung wurde der Punkt Maloja ins Netz eingebunden.

Damit war der eigentliche Aufbau des LSN und die ursprünglich im Projekt vorgesehenen Feldarbeiten abgeschlossen.

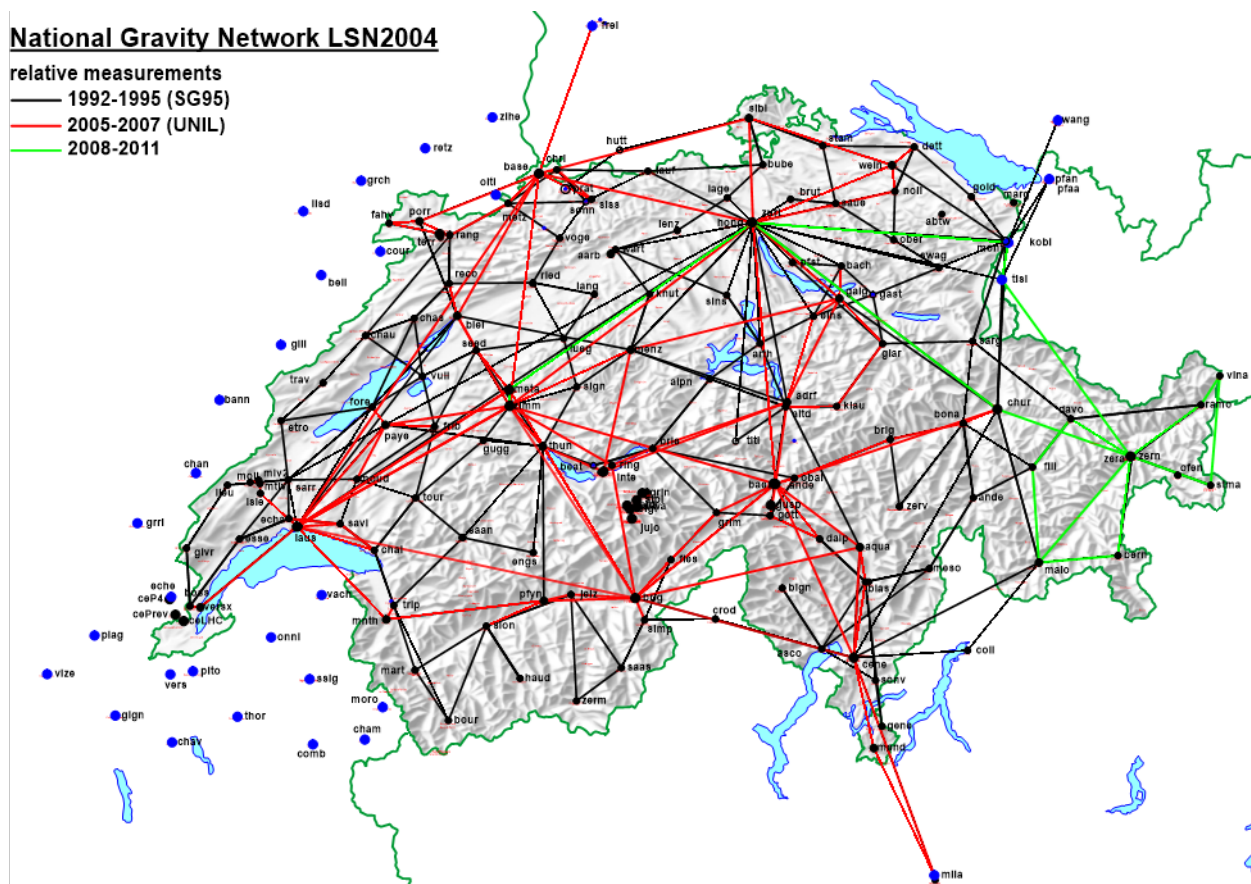


Abbildung 8-1: Stand des LSN 2009 (Abschluss der Aufbauphase)

8.2 Unterhalt ab 2009

Ab 2009 erfolgten die Absolutmessungen mit dem FG5 auf den bereits in SG95 enthaltenen Stationen. Dies waren 2009 Lausanne und Zürich sowie 2010 Monte Ceneri und eine Nachmessung in Andermatt. Die Neumessung in Chur konnte aus verschiedenen Gründen (Probleme und Umbau des FG5, Nichtzugänglichkeit des Punktes) erst 2013 durchgeführt werden. 2013 erfolgte auch eine Wiederholung der Messung in Basel.

Zwischen 2010 und 2015 erfolgten auch die Absolutmessungen auf den Stationen der Kalibrationslinie Interlaken–Jungfrauoch. Damit war 2015 die erstmalige Beobachtung aller Absolutstationen des LSN abgeschlossen. Seither erfolgen Wiederholungsmessungen in Brig und Alpighlen (2015), Zernez (2018), Lausanne und Zürich (2019), Monte Ceneri und Andermatt (2021), sowie Grindelwald, Chur und Basel (2022). Weitere Absolutmessungen in diesem Zeitraum fanden 2009 im Felslabor Mont Terri und auf drei Punkten am CERN statt. Diese Punkte gelten nicht als eigentlicher Bestandteil des LSN, sind aber heute ebenfalls gut mit dem Netz verknüpft.

In Zimmerwald erfolgten bis heute Messungen in den Jahren 2004–2010, 2013, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 und 2021. Dass das Ziel der jährlichen Messung nicht ganz eingehalten werden konnte, lag vor allem an Geräte-Problemen oder der Nicht-Verfügbarkeit des FG5.

Das CG-5 von ETHZ/swisstopo konnte ab 2012 produktiv für die Messungen im LSN eingesetzt werden. Vorher war es durch andere Arbeiten (ETH Zürich, CERN, Schweremessungen für das LHN) ausgelastet. Das erste Ziel der Relativmessungen ab 2012 war, dass auf jedem Punkt 2. Ordnung mindestens eine Messung mit dem CG-5 durchgeführt werden sollte. Dafür wurden mehrere Kampagnen durchgeführt, wobei im Schnitt etwa zehn Messtage pro Jahr eingesetzt wurden. 2015 war dieses Ziel erreicht. Danach (ab 2015) wurde mit dem Aufbau des Netzes 3. Ordnung begonnen und 2017 war jeder Punkt 2. Ordnung mindestens zweimal mit einem CG-5 beobachtet (Ausnahme: Monte Generoso).

Abbildung 8-2 zeigt den Stand des LSN Ende 2021. Die roten Punkte zeigen die beobachteten Stationen 3.Ordnung. In Anhang A3 ist ersichtlich, wie oft und wann zum letzten Mal eine Station seit 2004 gemessen wurde.

National Gravity Network LSN2004

relative measurements

- 1992-1995 (SG95)
- 2005-2007 (UNIL)
- 2008-2011
- 2012
- 2013
- 2014
- 2015
- 2016
- 2017
- 2018
- 2019
- 2020
- 2021

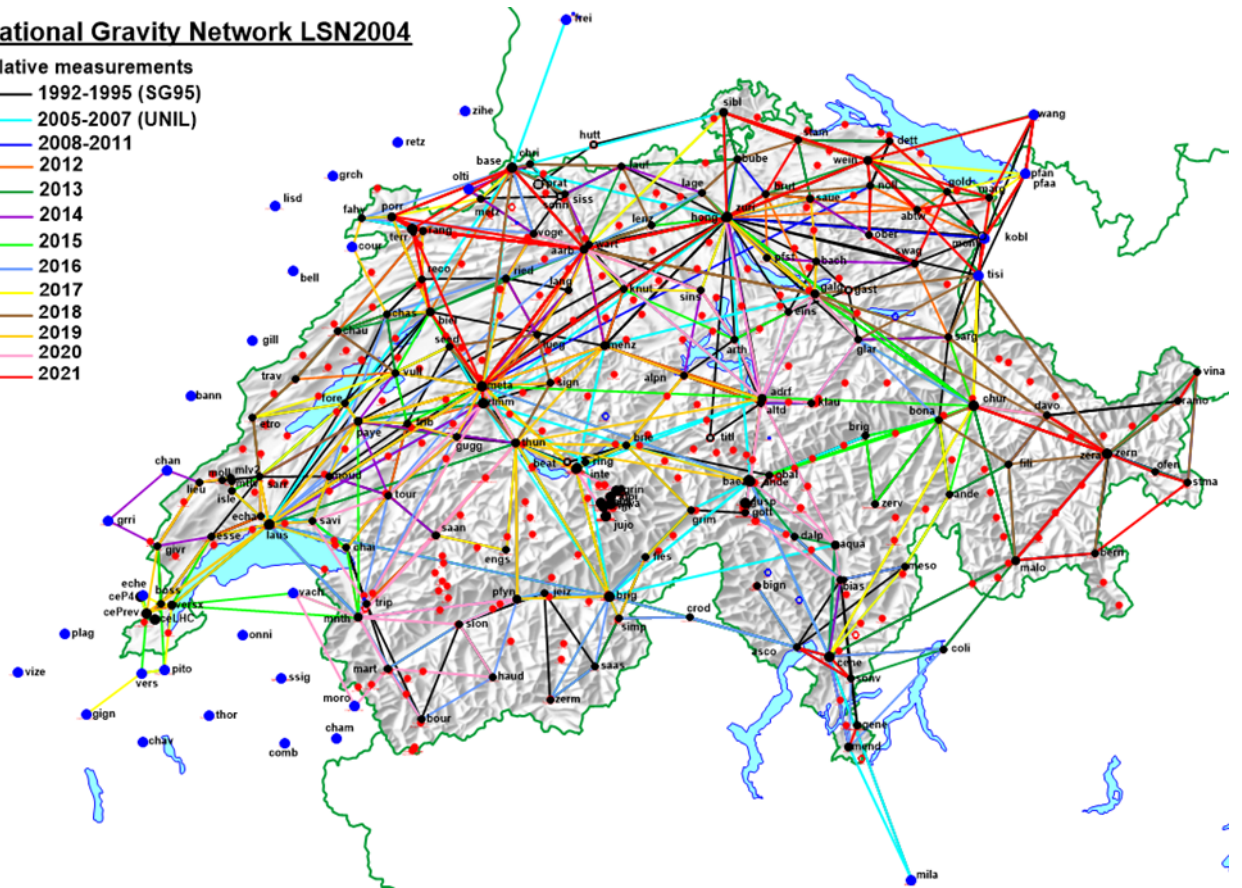


Abbildung 8-2: Stand des LSN Ende 2021

9 Absolutmessungen

9.1 Durchführen der Messung

Die Absolutmessungen in der Schweiz werden in der Regel mit dem FG5 #209 des METAS gemessen, welches 2012 zu einem FG5x aufgerüstet wurde. Dieses Instrument ist normalerweise auf dem Punkt WAN A im Wattwaage-Labor des METAS stationiert, wo üblicherweise eine Messung pro Monat durchgeführt wird.

Die Hauptbestandteile des FG5 sind

- Stativ der Superspring
- Superspring mit Referenzprisma
- Interferometer
- Laser
- Ionenpumpe
- Stativ der Fallkammer
- Fallkammer mit Freifall-Prisma
- Steuerelektronik
- Steuer-Computer
- Uhr

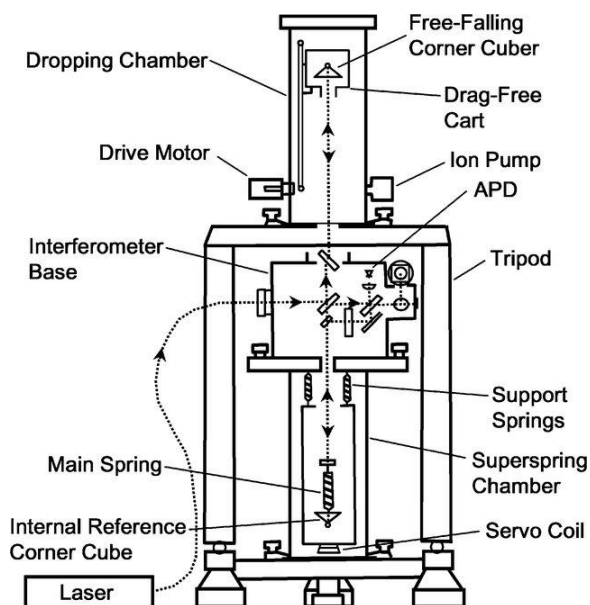


Abbildung 9-1: Schema der Teile des FG5 und Lichtweg

Für den Transport wird das Instrument zerlegt und in mehrere Kisten verpackt. Diese füllen einen grösseren PW (Kombi) und das Gesamtgewicht beträgt ca. 130 kg. Während des Transports muss die Ionenpumpe immer am Strom angeschlossen sein, damit das Vakuum in der Fallkammer erhalten bleibt.

Für den Transport und den Aufbau genügt im Prinzip eine Person, eine zweite Hilfe ist jedoch nützlich.

Der Aufbau des Instruments dauert inklusive Justierung und Feineinstellungen ca. 1 Stunde. Danach kann im Programm «g» das Messprogramm eingestellt werden. Dies umfasst insbesondere die Anzahl der durchzuführenden Messreihen (Sets) und der Drops pro Set, die durchzuführen sind. Ein für das LSN häufig gewähltes Szenario war 24 Sets (Start jede Stunde) mit jeweils 100 Drops – auf unruhigeren Stationen auch manchmal 200 Drops. Dies ergibt eine totale Messzeit von 24 Stunden.

Danach läuft das Messprogramm autonom durch. Es empfiehlt sich aber doch ab und zu eine Kontrolle, ob alles wie gewünscht funktioniert und ob das Instrument noch gut horizontal ist.

Nach dem Abschluss der Messungen wird das Instrument wieder zerlegt und in die Transportkisten verpackt.

Beim erstmaligen Beobachten einer Absolutstation wird vor oder nach der eigentlichen Messung noch der Vertikalgradient gemessen (mehr dazu in Kapitel 11).

9.2 Auswertung der Absolutmessungen

9.2.1 Beobachtungsgleichungen

Die Steuerung und die Auswertung von Absolutmessungen mit einem FG5 und anderen Gravimetern desselben Herstellers erfolgen mit der Software «g» von Micro-g-LaCoste.

Die eigentlichen Rohdaten einer Absolutmessung sind das Interferenzmuster (Fringes) des Lasers durch das fallende und durch das feste Prisma für jedes Freifallexperiment. Registriert werden pro Fallexperiment normalerweise Hunderte von Nulldurchgängen, welche jede halbe Wellenlänge λ des Laserlichts auftreten. Dies ergibt Beobachtungspaare t_i (Zeit) und x_i (Position) wie in Abbildung 9-2 dargestellt.

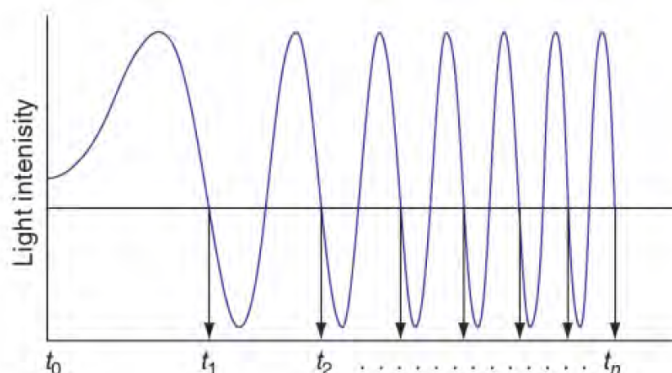


Abbildung 9-2: Nulldurchgänge des Interferenzmusters als Messgrößen der absoluten Gravimetrie

Das ergäbe eigentlich die sehr einfachen Beobachtungsgleichungen, welche eine Parabel beschreiben:

$$x_i = x_0 + v_0 t_i + \frac{1}{2} g_0 t_i^2$$

Da nun aber die Schwere nicht über den ganzen Messbereich konstant ist, sondern der Vertikalgradient γ eine Rolle spielt, weil die Lichtgeschwindigkeit nicht unendlich ist und der Lichtweg durch das obere Prisma immer kürzer wird, werden die tatsächlich verwendeten Beobachtungsgleichungen etwas komplizierter:

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{1}{2} \gamma x_0 \tilde{t}_i^2 + \frac{1}{6} \gamma v_0 \tilde{t}_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{t}_i^4$$

$$\tilde{t} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c}$$

mit:

- x_0 Initialposition
- v_0 Initialgeschwindigkeit
- g_0 Initialbeschleunigung (unbekannte Schwere)
- c Lichtgeschwindigkeit
- γ Vertikalgradient der Schwere
- x_i, t_i gemessene Position und Zeit der Nulldurchgänge

Als Unbekannte tritt neben der eigentlich interessierenden Schwere g_0 auch der Ort x_0 auf, wo diese gültig ist und auch die nicht weiter interessierende Initialgeschwindigkeit v_0 . Der Vertikalgradient γ muss als bekannt eingeführt werden.

Da die Position x_0 ziemlich beliebig ist, wird diese üblicherweise noch auf eine Standardhöhe umgerechnet (beim FG5 wird oft 1.30 m über Boden verwendet).

9.2.2 Mittelbildung

Einzelne Freifallversuche (Drops) ergeben für den Schwerewert auf stabilen Stationen eine formelle Standardabweichung der Schwere in der Grössenordnung von etwa $\pm 5 \mu\text{Gal}$. Ausreisser werden nach einem vom Benutzer frei wählbaren Kriterium (z.B. 3σ) automatisch eliminiert. Das Beispiel in Abbildung 9-3 ergibt eine Genauigkeit eines Drops von $\pm 12.55 \mu\text{Gal}$, was eher schlecht ist. Eine grössere Genauigkeit lässt sich erzielen, indem mehrere Drops zu einem Set zusammengefasst werden. Üblich sind 100 oder auch 200 Drops pro Set, je nach Stabilität der Station. Dadurch ergeben sich auf stabilen Stationen üblicherweise formelle Genauigkeiten der Sets von besser als $\pm 1 \mu\text{Gal}$ (in Abbildung 9-3 z.B. $0.89 \mu\text{Gal}$), was sicherlich zu optimistisch ist. Deshalb wird für die Angabe der Messunsicherheit eines Sets noch ein empirischer Anteil von systematischen Fehlern addiert, so dass diese dann normalerweise in die Grössenordnung von 3–4 μGal zu liegen kommt (mehr dazu in Kapitel 9.2.4).

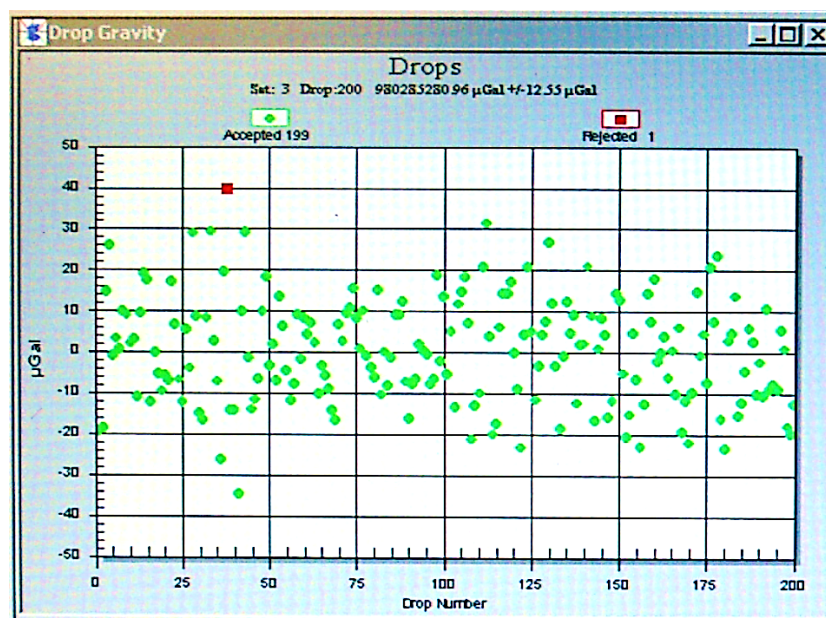


Abbildung 9-3: Einzelne Drops (Beispiel Zernež 2008, Set Nr. 10 in Abbildung 9-4)

Das Schlussresultat einer Absolutmessung wird dann noch durch die Mittelung der einzelnen Sets erhalten, wobei individuelle Sets auch noch eliminiert werden können.

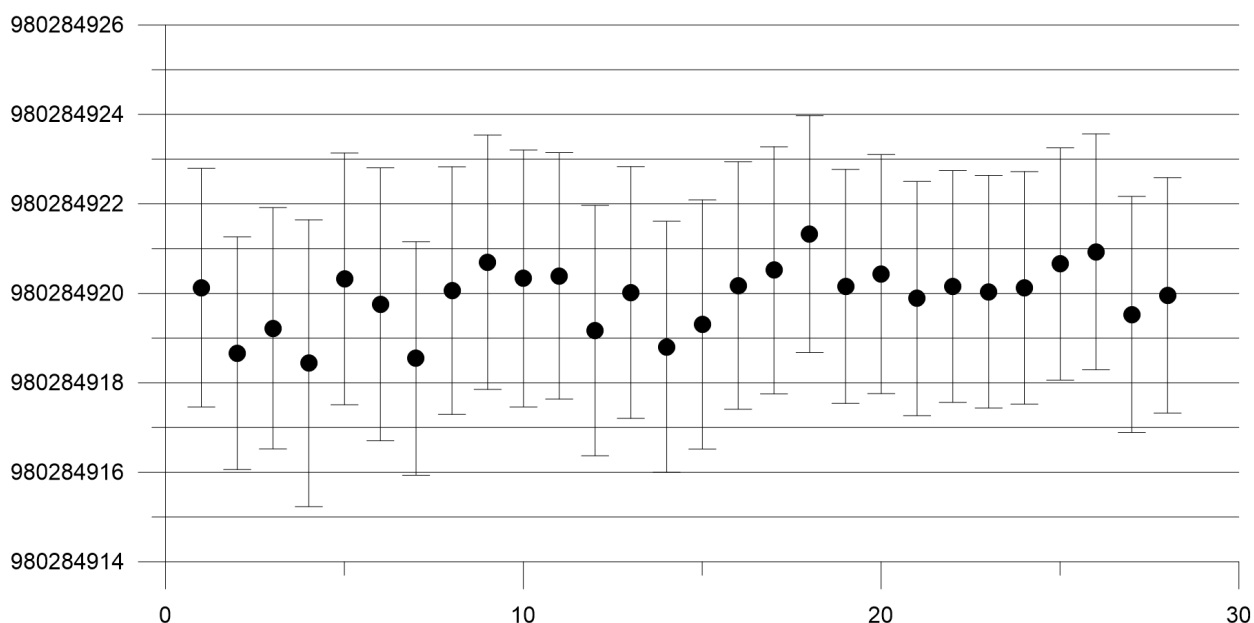


Abbildung 9-4: Auswertung der Sets von Zernež 2008

Wenn man die einzelnen Sets mittelt, resultiert meistens eine Standardabweichung des Mittelwerts, welche deutlich kleiner als $1 \mu\text{Gal}$ ist. Aber auch hier wird für die Angabe der Messunsicherheit ein systematischer Anteil berücksichtigt, der dazu führt, dass sich die ausgewiesene Messunsicherheit des Gesamtergebnisses nicht stark von derjenigen eines einzelnen Sets unterscheidet.

9.2.3 Berücksichtigte Korrekturen

Das Resultat eines Freifall-Experiments ist eine Momentaufnahme und muss standardisiert werden, um mit anderen Resultaten vergleichbar zu werden. Dazu sind mehrere Korrekturen nötig, welche in den IAGBN-Standards (International Absolute Gravity Basestation Network, [Boedecker 1993]) beschrieben sind.

Die wichtigste Korrektur ist sicherlich die **Gezeitenkorrektur**, welche bis etwa $200 \mu\text{Gal}$ betragen kann. Verwendet wird defaultmässig ETGTAB mit den Wellengruppen nach Tamura. Dies kann aber durch den Benutzer angepasst werden und beispielsweise durch beobachtete Wellengruppen von einem Gezeitengravimeter ersetzt werden.

Je nach dem gewählten Gezeitenmodell muss auch eine Korrektur von **Ocean Loading** angebracht werden. Auch hier hat der Benutzer die Wahl verschiedener Modelle. Für jede Station muss das Ocean-Loading-File vor der Auswertung erstellt werden. Diese Korrektur beträgt einige wenige μGal .

Die Absolutmessung wird auch durch den Luftdruck beeinflusst. Dies führt zur **barometrischen Korrektur** C_p . Dabei wird der aktuelle Luftdruck p_o mit dem Normaldruck p_n (gerechnet mit der barometrischen Höhenformel) verglichen und die folgende Korrektur angebracht:

$$C_p = A \cdot (p_o - p_n)$$

Dabei ist A der sogenannte «Admittance Factor», welcher Druckunterschiede mit Schwereunterschieden verknüpft. Von der IAG vorgeschlagen wird ein Wert von $0.3 \mu\text{Gal}/\text{hPa}$. Das führt zu barometrischen Korrekturen von wenigen μGal .

Die momentanen **Polkoordinaten** x und y verursachen gegenüber dem Referenzpol (IERS Reference Pole) eine leicht veränderte Zentrifugalbeschleunigung, welche mit folgender Formel berücksichtigt wird:

$$dg = -1.164 \cdot 10^8 \omega^2 a^2 \sin \varphi \cos \varphi (x \cos \lambda - y \sin \lambda)$$

mit ω : Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation; a : grosse Halbachse des Erdellipsoids; φ , λ : ellipsoidische Breite und Länge; x , y : Polkoordinaten; elastic gravimetric factor = 1.164. Auch diese Korrektur hat die Grössenordnung von wenigen μGal .

Da die Beobachtungsgleichung streng genommen für den Zeitpunkt t_0 ausgewertet wird und nicht exakt bei der Startposition x_0 , ergibt dies noch eine minimale Korrektur, welche «**Reference x_0** » genannt wird. Sie hängt leicht vom Vertikalgradienten ab, ist aber mit maximal $0.05 \mu\text{Gal}$ so klein, dass sie praktisch bedeutungslos ist.

Die Initialposition x_0 , an welcher die berechnete Schwere gilt, schwankt leicht von Messung zu Messung und ist auch charakteristisch für jedes individuelle Instrument. Bei einem FG5 ist dies irgendwo zwischen 120 und 140 cm, bei einem FG5x ein paar cm höher. Deshalb wird die publizierte Schwere üblicherweise auf eine Standard-Instrumentenhöhe umgerechnet. Oft verwendet wird beim FG5 eine Initialposition von 130 cm. Dies wird als **Transfer-Korrektur** (in älteren Versionen von «g» auch als Datums-Korrektur) bezeichnet. Diese ist natürlich vom verwendeten Vertikalgradienten abhängig und ist umso grösser, je weiter x_0 von der gewählten Referenzhöhe abweicht – im Extremfall mehrere $100 \mu\text{Gal}$, falls als Referenzhöhe 0 (Reduktion der Schwere auf den Boden) gewählt wird.

Ab der Version 9 von «g» sind noch drei weitere Korrekturen vorgesehen: **Self-Attraction** berücksichtigt die Eigenmasse des Gravimeters auf die Schwere; **Diffraction** berücksichtigt systematische Fehler, falls der Laserstrahl nicht stark genug gebündelt ist; **Tilt** korrigiert eine nicht perfekt vertikale Ausrichtung des Gravimeters.

9.2.4 Messunsicherheit

Wenn man nur die Streuung der einzelnen Drops oder auch Sets anschaut, so resultiert meistens eine Genauigkeit unter $1 \mu\text{Gal}$, was aufgrund der Wiederholbarkeit, aber auch aus instrumentellen Gründen nicht realistisch ist. Deshalb wird für die Angabe der Messunsicherheit noch eine Anzahl von systematischen Fehleranteilen berücksichtigt.

Die totale Messunsicherheit δ_{tot} ergibt sich aus dem statistischen Anteil δ_{stat} und dem systematischen Anteil δ_{syst} nach

$$\delta_{tot} = \sqrt{\delta_{stat}^2 + d_{syst}^2}$$

wobei δ_{stat} der Standardabweichung eines Sets, dividiert durch die Wurzel der Anzahl Sets entspricht.

δ_{syst} wiederum setzt sich aus der quadratischen Aufsummierung der einzelnen systematischen Fehleranteile zusammen, welche normalerweise empirisch bestimmt sind. Sie sind in der folgenden Tabelle 9-1 zusammengefasst.

Tabelle 9-1: Systematische Anteile an der Messunsicherheit einer Absolutmessung

Fehleranteil	Standardwert [μGal]	Bemerkungen
Modelle		
Barometrische Korrektur	1.0	
Polschwankungen	0.05	
Erdgezeiten	(0.2)	1 Promille des Betrags der Korrektur
Ocean Loading	(0.2)	10 Prozent des Betrags der Korrektur
Instrument		
Genauigkeit des Lasers	0.01	Je nach Typ des verwendeten Lasers
Genauigkeit der Zeitmessung	0.50	Für Rubidium Uhr
System-Typ	1.1	Typ des Gravimeters (FG5)
Umwelt		
Meeresgezeiten	0.0	Nur an Küstennähe wichtig
Grundwasserspiegel	0.0	Meistens keine Informationen verfügbar
Unmodellierete Umgebungseinflüsse	0.0	
Aufstellung		
System-Setup	1.0	Genauigkeit der Aufstellung (z.B. Vertikalität)

Das quadratische Aufsummieren der Werte aus Tabelle 9-1 ergibt einen Anteil δ_{syst} an der totalen Messunsicherheit von etwa $1.8 \mu\text{Gal}$. Für gute Messungen fällt dann der Anteil der Streuung der Sets δ_{stat} von einigen Zehntel μGal kaum mehr ins Gewicht und die ausgewiesene totale Messunsicherheit aller Absolut-

messungen ergibt etwa denselben Betrag, falls die Modellierung der systematischen Fehleranteile gleich angesetzt wird. Für einige Messungen des METAS wurden aber nicht die Default-Werte verwendet, sondern etwa für «System Setup» 2 μGal oder für «Umgebungseinflüsse» 3 μGal eingeführt, was dann die dokumentierte Messunsicherheit deutlich erhöht.

Neben den oben erwähnten systematischen Fehleranteilen spielt natürlich auch die Genauigkeit des verwendeten **Vertikalgradienten** eine Rolle. Der von Micro-g vorgeschlagene Defaultwert dafür ist 3 $\mu\text{Gal}/\text{m}$. Dies führt insbesondere bei der Reduktion des Messwerts auf den Boden zu einem zusätzlichen Fehleranteil von fast 4 μGal , was damit dann auch zur grössten Fehlerquelle für die totale Messunsicherheit wird. Deshalb wird versucht, die Vertikalgradienten mit höchster Präzision (im Bereich von 1 $\mu\text{Gal}/\text{m}$) zu messen, um auch am Boden eine Genauigkeit im Bereich von 3-4 μGal zu erhalten.

In den Messberichten des METAS ist nicht die hier beschriebene einfache Messunsicherheit ausgewiesen, sondern wird noch mit einem Faktor $K=2$ multipliziert, was die erweiterte Messunsicherheit U mit einem 95%-Prozent Vertrauensintervall ergibt und somit der ISO-Norm [GUM, 1995] entspricht.

9.3 Dokumentation der Resultate

Das wichtigste Resultat-File der Software «g» ist das sogenannte Project-File, welches alle relevanten Angaben zur Messung und Auswertung enthält und sich zu einem Quasi-Standard für die Dokumentation von absoluten Schweremessungen entwickelt hat. Das File ist in folgende Abschnitte gegliedert:

- Software-Version für Messung und Auswertung.
- Institution und Beobachter, welche die Messungen durchgeführt haben.
- Stationsangaben (Name, Breite, Länge, Höhe, Instrumentenhöhe, Vertikalgradient).
- Angaben zu gewählten Korrekturmodellen (Druck, Pol-Koordinaten, Gezeiten, Ocean Loading).
- Angaben zum Instrument (Typ, Seriennummer, Uhr, Laser).
- Resultate der Messung mit Datum, Zeit, Schwerewert, Genauigkeiten und Angaben zu der Anzahl durchgeführten Messungen (Sets, Drops, Fringes).
- Messkonfiguration (Intervall der Sets und Drops, Anzahl der Sets und Drops).
- Schwerekorrekturen (Gezeiten, Ocean Load, Polkoordinaten, Luftdruck, TransferHeight, RefX₀) als Mittelwerte der Korrekturen der einzelnen Sets.
- Systematische Anteile der Messunsicherheit.
- Kommentare.

Das Project-File kann an die internationale absolute Schwere-Datenbank AGRAV (<http://agrav.bkg.bund.de/>) hochgeladen werden, welche vom BKG und vom BGI gemeinsam betrieben wird. Dort werden dann die benötigten Angaben automatisch extrahiert und in die entsprechenden Datenbank-Felder abgefüllt.

Neben dem Project-File wird üblicherweise auch das Sets-File abgespeichert. Es enthält die wichtigsten Angaben zu den einzelnen Sets in Tabellenform, was sehr nützlich für die genauere Analyse der im Project-File enthaltenen Schlussresultate ist. Es enthält die folgenden Spalten: Set-Nummer, Zeit, Datum, Schwerewert, Standardabweichung der Drops, Standardabweichung des Sets, totale Messunsicherheit des Sets, Gezeitenkorrektur, Ocean Loading, barometrische Korrektur, Pol-Korrektur, Transfer-Korrektur, RefX₀-Korrektur, Tilt, Temperatur, Luftdruck, sechs frei wählbare Hilfskanäle, Anzahl akzeptierte Drops, Anzahl eliminierte Drops. Das Sets-File wird bei swisstopo in erster Linie verwendet, um die Grafiken wie beispielsweise in Abbildung 9-4 herzustellen.

Ab der Version 9 von «g» können auch noch weitere Output-Dateien generiert werden, wie die Detailangaben zu den Drops oder zu den Fringes sowie eine ganze Palette an Grafiken. Darauf wird aber bei Standard-Messungen verzichtet.

Zu jeder Absolutmessung gibt es auch einen kurzen Messbericht (Kalibrierzertifikat) des METAS, welcher im Anhang auch die Project- und Sets-Dateien enthält.

Zu einigen Absolutmessungen bestehen auch detaillierte Berichte in der Reihe «swisstopo-Reports»; diese enthalten insbesondere auch Einzelheiten zur Punktbeschreibung, zur Koordinatenbestimmung, zum Anschluss ans LHN oder zur Bestimmung des Vertikalgradienten [Marti und Richard, 2006; Marti und Richard, 2007; Marti und Baumann, 2010a; Marti und Baumann 2010b].

9.4 Durchgeführte Absolutmessungen

Im Folgenden sind alle seit 2004 in der Schweiz durchgeführten Absolutmessungen aufgelistet. Die älteren Messungen sind hier nicht mehr aufgeführt. Sie können in verschiedenen swisstopo-Reports gefunden werden.

Ebenfalls nicht einzeln aufgeführt sind die vielen im Wattwaage-Labor des METAS durchgeführten Messungen. Für die Gesamtausgleichung im LSN wurde für diese Punkte nur der Mittelwert aller Messungen (Stand 2020) als Beobachtung eingeführt.

Auch die Messungen auf den Anschlusspunkten ans Ausland, welche durch das BEV, das BKG und das IGN durchgeführt wurden, sind nicht enthalten.

Die in Tabelle 9-2 aufgeführten Resultate sind so, wie sie in der Gesamtausgleichung verwendet wurden. Diese können sich von den Messberichten des METAS wegen eventuellen Neuauswertungen mit leicht modifizierten Parametern (insbesondere Gradient, aber auch Elimination von einzelnen Sets) leicht unterscheiden. Die Schwerewerte und Standardabweichungen sind auf μGal gerundet.

Einige Absolutmessungen wurden in mehrere Projekte aufgeteilt. In diesem Fall finden sich mehrere Einträge mit ähnlichem Datum in der Tabelle.

Bis 2010 wurden alle Messungen vom METAS mit dem FG5 #209 durchgeführt. Ab 2013 wurde mit dem modifizierten Instrument FG5x gemessen.

Tabelle 9-2: Resultate der Absolutmessungen in der Schweiz seit 2004

Station	LSN-Nr	Datum	Schwere (H=IH)	RMS	IH	Gradient	Schwere (H=0)
Zimmerwald	0001.0	17.03.2004	980512.277	0.003	130	0.2571	980512.611
Zimmerwald	0001.0	16.03.2005	980512.280	0.003	130	0.2571	980512.614
Brig	0006.0	07.07.2005	980407.098	0.003	130	0.2380	980407.407
Basel	0005.0	29.03.2006	980763.859	0.002	130	0.2557	980764.191
Zimmerwald	0001.0	11.10.2006	980512.271	0.003	130	0.2571	980512.605
Zimmerwald	0001.0	22.11.2007	980512.272	0.003	130	0.2571	980512.606
Andermatt	0007.0	15.04.2008	980304.044	0.006	130	0.1512	980304.240
Zernez	0010.0	16.04.2008	980284.920	0.003	130	0.2300	980285.219
Zimmerwald	0001.0	19.04.2008	980512.276	0.003	130	0.2571	980512.610
Wabern ZA13	0004.4	21.04.2008	980587.637	0.003	130	0.3055	980588.034
Lausanne	0003.0	17.05.2009	980604.396	0.003	130	0.2551	980604.728
Zürich	0002.0	19.05.2009	980647.624	0.003	130	0.2625	980647.965
Zimmerwald	0001.0	20.05.2009	980512.271	0.003	130	0.2571	980512.606
Mont Terri	0016.0	22.08.2009	980661.537	0.003	130	0.2571	980661.871
CERN LHCB	0017.0	29.06.2009	980587.575	0.003	130	0.1780	980587.806
CERN PREV	0017.1	28.06.2009	980576.041	0.003	130	0.2580	980576.376
CERN Pt4	0017.2	27.06.2009	980557.107	0.003	130	0.2980	980557.494
Andermatt	0007.0	18.05.2010	980304.036	0.003	130	0.1512	980304.232
Monte Ceneri	0008.0	19.05.2010	980511.473	0.003	130	0.2799	980511.837
Zimmerwald	0001.0	19.05.2010	980512.274	0.003	130	0.2571	980512.608
Zimmerwald	0001.0	21.05.2010	980512.270	0.003	130	0.2571	980512.604
Zimmerwald	0001.0	28.05.2010	980512.268	0.003	130	0.2571	980512.602
Zimmerwald	0001.0	04.06.2010	980512.271	0.003	130	0.2571	980512.605
Zimmerwald	0001.0	11.06.2010	980512.270	0.003	130	0.2571	980512.604
Zimmerwald	0001.0	18.06.2010	980512.266	0.003	130	0.2571	980512.600
Zimmerwald	0001.0	30.06.2010	980512.271	0.003	130	0.2571	980512.605
Zimmerwald	0001.0	15.07.2010	980512.270	0.003	130	0.2571	980512.604
Zimmerwald	0001.0	06.08.2010	980512.268	0.003	130	0.2571	980512.602
Zimmerwald	0001.0	13.08.2010	980512.268	0.003	130	0.2571	980512.602
Grindelwald	0019.0	13.09.2010	980378.784	0.002	130	0.1450	980378.973
Alpiglen	0018.0	14.09.2010	980283.019	0.003	130	0.2926	980283.400
Kl. Scheidegg	0020.0	21.10.2013	980204.261	0.003	130	0.2859	980204.633
Eigergletscher	0021.0	22.10.2013	980142.708	0.003	130	0.3091	980143.110
Eigerwand	0022.0	24.10.2013	979993.697	0.003	130	0.3623	979994.168
Jungfrauoch	0013.2	23.10.2013	979899.782	0.003	130	0.3990	979900.301
Zimmerwald	0001.0	11.03.2013	980512.276	0.002	130	0.2571	980512.610
Zimmerwald	0001.0	12.03.2013	980512.278	0.002	130	0.2571	980512.612
Zimmerwald	0001.0	13.03.2013	980512.278	0.002	130	0.2571	980512.612
Zimmerwald	0001.0	14.03.2013	980512.276	0.002	130	0.2571	980512.611
Chur	0009.0	24.06.2013	980453.463	0.002	130	0.1951	980453.716
Basel	0005.0	01.07.2013	980763.863	0.002	130	0.2557	980764.195
Interlaken	0012.2	07.07.2015	980505.997	0.003	130	0.2564	980506.330
Brig	0006.0	08.07.2015	980407.097	0.003	130	0.2380	980407.407
Alpiglen	0018.0	09.07.2015	980283.007	0.003	130	0.2926	980283.387

Station	LSN-Nr	Datum	Schwere (H=IH)	RMS	IH	Gradient	Schwere (H=0)
Zimmerwald	0001.0	15.07.2015	980512.267	0.003	130	0.2571	980512.601
Zimmerwald	0001.0	26.10.2016	980512.271	0.003	130	0.2571	980512.605
Zimmerwald	0001.0	28.10.2016	980512.272	0.003	130	0.2571	980512.606
Zimmerwald	0001.0	02.11.2016	980512.272	0.003	130	0.2571	980512.606
Zimmerwald	0001.0	10.03.2017	980512.269	0.003	130	0.2571	980512.603
Zimmerwald	0001.0	14.03.2017	980512.267	0.003	130	0.2571	980512.602
Zimmerwald	0001.0	16.03.2017	980512.267	0.003	130	0.2571	980512.601
Zernez	0010.0	25.04.2018	980284.929	0.002	130	0.2300	980285.228
Zimmerwald	0001.0	27.04.2018	980512.265	0.003	130	0.2571	980512.599
Lausanne	0003.0	17.06.2019	980604.395	0.003	130	0.2551	980604.726
Lausanne	0003.0	18.06.2019	980604.396	0.003	130	0.2551	980604.728
Zürich	0002.0	18.06.2019	980647.621	0.003	130	0.2625	980647.962
Zimmerwald	0001.0	19.06.2019	980512.269	0.003	130	0.2571	980512.603
Zimmerwald	0001.0	21.06.2019	980512.270	0.003	130	0.2571	980512.604
Mont Terri	0016.0	25.02.2021	980661.541	0.003	130	0.2571	980661.875
Zimmerwald	0001.0	03.04.2021	980512.271	0.003	130	0.2571	980512.605
Andermatt	0007.0	03.08.2021	980304.039	0.003	130	0.1512	980304.235
Andermatt	0007.0	04.08.2021	980304.039	0.003	130	0.1512	980304.236
Monte Ceneri	0008.0	04.08.2021	980511.474	0.003	130	0.2799	980511.837
Monte Ceneri	0008.0	05.08.2021	980511.475	0.003	130	0.2799	980511.839
Zimmerwald	0001.0	08.08.2021	980512.280	0.003	130	0.2571	980512.615
Zimmerwald	0001.0	10.08.2021	980512.280	0.003	130	0.2571	980512.614
Basel	0005.0	19.07.2022	980763.856	0.003	130	0.2557	980764.188
Chur	0009.0	20.07.2022	980453.460	0.003	130	0.1951	980453.714
Grindelwald	0019.0	21.07.2022	980378.785	0.003	130	0.1450	980378.974

9.5 Wiederholbarkeit der Messungen

Für die Stationen am METAS und in Zimmerwald liegen heute längere Zeitreihen vor. Diese sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Für die meisten der anderen Stationen gibt es bisher zwei bis drei Messungen. Der Vergleich dieser Resultate ist anschliessend in Tabelle 9-3 zusammengestellt.

Am METAS wird normalerweise auf dem Punkt WAN A gemessen. Auf den übrigen Punkten im Wattwaage-Labor sind nur vereinzelt Messungen durchgeführt worden. Der Grossteil der Messungen liegt innerhalb von ca. 10 μGal (Abstand der horizontalen Gitterlinien in Abbildung 9-5). Ein langzeitlicher Trend ist in diesen Daten nicht zu sehen. Auch eine saisonale Schwankung ist auf den ersten Blick nicht sichtbar. Eine vertiefte Analyse [Marti, 2013b] hat aber gezeigt, dass die Messungen im Mittel im Mai (Höchstwert) um etwa 4 μGal höher sind als im September (Tiefstwert). Dies ist wohl vor allem durch die Hydrologie (Grundwasserspiegel und Bodensättigung) verursacht, obwohl die Korrelation mit den Grundwassermessungen am Flughafen Belp äusserst gering ist.

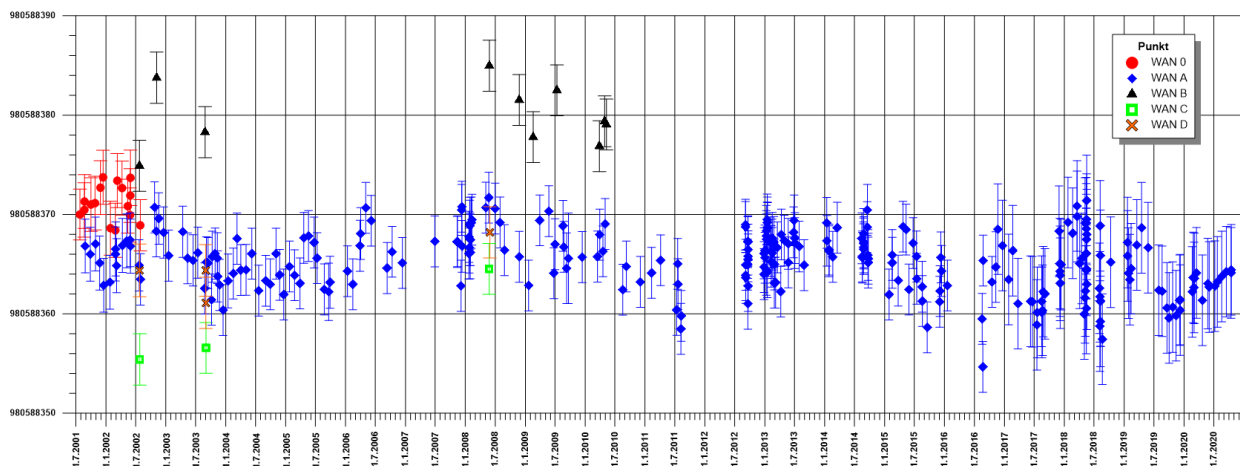


Abbildung 9-5: Absolutmessungen im Wattwaage-Labor am METAS

Die Zeitreihe in Zimmerwald umfasst inzwischen 15 Hauptmessungen (Abbildung 9-6). Auch in dieser Zeitreihe ist noch kein langzeitlicher Trend sichtbar. Eine lineare Regression ergibt eine Abnahme von 0.4 μGal pro Jahr, was jedoch noch nicht sehr signifikant ist. Eine erste Vermutung für eine Schwereänderung war der Neubau des IAP-Gebäudes direkt über der Absolutstation. Zwischen den Messungen 2004/2005 und 2006/2007 gibt es einen kleinen Sprung von etwa -6 μGal . Die späteren Messungen bestätigten allerdings diese Vermutung nicht. Eine zweite Vermutung waren saisonale Schwankungen, da die Messungen zunächst im Frühling immer höher waren als im Sommer/Herbst. Aber spätestens mit den Messungen 2017 und 2018 wurde auch diese Vermutung stark entkräftet. Auch die Daten des Gezeitengravimeters LCR ET25, welches in Zimmerwald seit 1998 stationiert ist, geben keine Hinweise auf saisonale Schwankungen.

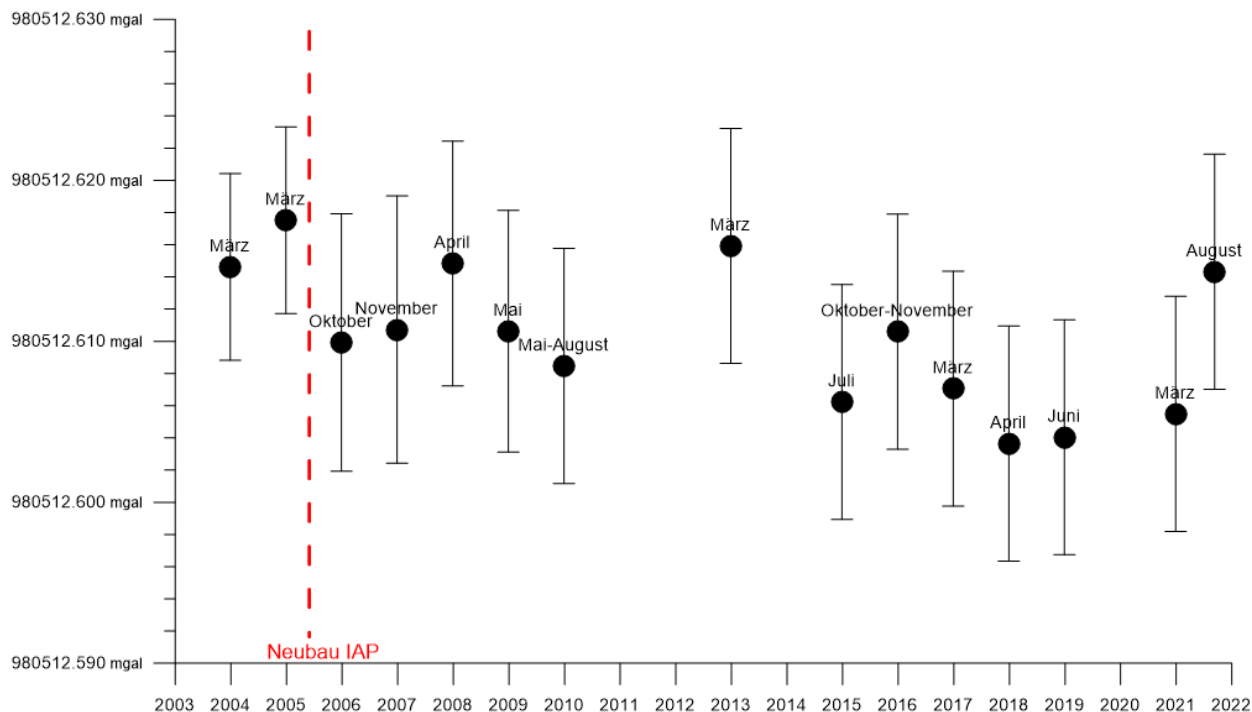


Abbildung 9-6: Zeitreihe der Absolutmessungen in Zimmerwald

Auf den übrigen Absolutstationen liegen meistens 2–3 Messungen vor. Der Vergleich derer auf den Boden reduzierten Werte ist in Tabelle 9-3 dargestellt. Zum Vergleich wurden auch die 1994 vom BEV mit dem JilaG durchgeführten Messungen verwendet. Die Kolonne D1 zeigt die Differenz zwischen Messungen 1 und 2 und die Kolonne D2 die Differenz der Messungen 2 und 3 (in μGal). Eine Aussage über Schwereänderungen ist natürlich mit so wenigen Messungen noch nicht möglich. Der Vergleich ist eher als Indiz der Wiederholbarkeit zu verstehen.

Tabelle 9-3: Wiederholt gemessene Absolutstationen

Station	Jahr 1	Schwere 1	Jahr 2	Schwere 2	Jahr 3	Schwere 3	D1	D2
Zürich	1994	980647.973	2009	980647.965	2019	980647.962	-7.9	-2.8
Lausanne	1994	980604.734	2009	980604.728	2019	980604.727	-6.8	-0.9
Monte Ceneri	1994	980511.834	2010	980511.837	2021	980511.838	2.4	1.3
Chur	1994	980453.726	2013	980453.716	2022	980453.714	-10.3	-2.4
Brig			2005	980407.407	2015	980407.407		-0.6
Basel	2006	980764.191	2013	980764.195	2022	980764.188	4.0	-7.1
Andermatt	2008	980304.240	2010	980304.232	2021	980304.236	-8.2	3.4
Zernez			2008	980285.219	2018	980285.228		9.0
Mont Terri			2009	980661.871	2021	980661.875		4.0
Alpiglen			2010	980283.400	2015	980283.387		-12.6
Grindelwald			2010	980378.973	2022	980378.974		1.0

10 Relativmessungen

10.1 Eingesetzte Instrumente

Die Relativmessungen für das LSN wurden grösstenteils mit einem Scintrex CG-5 durchgeführt. In der Anfangsphase 2005–2007 konnte dazu das Instrument #32 der Uni Lausanne (Institut für Geophysik) verwendet werden. In diesen Kampagnen wurde auch teilweise parallel mit weiteren Instrumenten (z.B. Scintrex CG-3, LCR) der Uni Lausanne beobachtet. Ab 2008 stand dann das gemeinsam von der ETH Zürich (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie) und swisstopo beschaffte CG-5 #307 zur Verfügung, welches nach erheblichen Anfangsschwierigkeiten und anderweitigen Nutzung ab 2012 für das LSN eingesetzt werden konnte. Seit 2020 steht auch das Scintrex CG-6 #248 von swisstopo zur Verfügung.

Vereinzelt wurden für das LSN auch Messungen mit weiteren CG-5 Gravimetern durchgeführt. Es sind dies ein Leihgerät von ABEM France (#1309), das Instrument der Uni Neuchâtel (#661) und dasjenige von RBR Geophysics (#1339).

Neben diesen hauptsächlich verwendeten Instrumenten treten in der Gesamtausgleichung des LSN auch verschiedene LCR Gravimeter auf. Dies sind vor allem diejenigen der ETH Zürich (G#317, G#514, G#839, D#86) und der Uni Lausanne (#846, #479). Weitere gelegentlich verwendete Instrumente sind das Scintrex CG-3M des METAS und das ZLS Burris der BAdW.

10.2 Vorbereitung der Messungen

Vor dem Feldeinsatz ist eine Messplanung durchzuführen und die ungefähren Fahr- und Messzeiten abzuschätzen. Dies erfolgt am einfachsten mit einem Routenplaner.

Auf dem CG-5 ist eine Messkampagne zu definieren und die ungefähren Koordinaten (Länge, Breite) des Messgebiets einzugeben, damit die Gezeitenkorrekturen richtig gerechnet werden können. Die Uhr sollte auf UT (Universal Time) mit einer Genauigkeit von besser als 1 Minute eingestellt werden. Es gilt die Defaultoptionen für die Anzahl und Länge der Cycles zu definieren und die angebrachten Korrekturen zu überprüfen. Eine weitere Überprüfung ist die Auslastung des Speichers. Vor jeder grösseren Kampagne sollte zudem eine Tilt-Kalibration durchgeführt werden.

Da es normalerweise einfacher ist, einige Felddaten im Feld auf Papier zu notieren, statt direkt im Gravimeter einzutippen, sollten auch genügend Feldblätter ausgedruckt werden. Dieses Formular sollte zumindest folgende Angaben aufweisen:

- Verwendetes Instrument
- Name der Messkampagne
- Datum
- verwendete Zeitzone
- Beobachter
- Messsystem (wie die Instrumentenhöhe gemessen wurde)

Und danach in Tabellenform für jede Messung:

- Ablesezeitpunkt
- Intern im Gravimeter verwendete Punktnummer
- Zuordnung zum LSN-Punkt (Name, Ort, HFP-Nummer, ...)
- Gravimeterablesung
- Höhe des Instruments über Boden (Instrumentenhöhe)
- Höhe des Messpunktes über Boden (Punkthöhe)
- Bemerkungen

10.3 Messablauf

Die Relativmessungen für das LSN erfolgten grösstenteils in einfachen Schleifen, wobei auf einem gut bekannten Punkt begonnen und abgeschlossen wurde. Dies ergibt ein Messschema für 4 Punkte gemäss A-B-C-D-A. Auf ein besseres Schema wie A-B-C-D-C-B-A wurde wegen der grossen Distanzen zwischen den Punkten im LSN üblicherweise verzichtet. Dies hat den Nachteil, dass eine einzelne Schleife eines Messtages normalerweise keine Überbestimmung aufweist und somit Sprünge und nichtlineare Drifts aus

der Einzelauswertung eines Tages nicht aufgedeckt werden können. Hinweise darauf ergeben sich nur durch ungewöhnliche Driftwerte oder dann erst in der Gesamtausgleichung bei wiederholt beobachteten Punkten. Ein gutes Mittel zur Kontrolle von Drift und Sprüngen ist auch das parallele Messen mit mehreren Gravimetern, was aber auch nur ausnahmsweise durchgeführt werden konnte. Am ersten und letzten Messtag einer längeren Kampagne kam in der Regel das Schema A-B-C-D zur Anwendung. Dies ist natürlich entgegen jeder Empfehlung für gute Resultate, war aber oft nicht zu vermeiden. Immerhin wurde immer darauf geachtet, dass der Startpunkt A und der Endpunkt D gut bekannte Schweren aufweisen.

Bei der Stationierung auf einem Punkt wird zunächst die Umgebung ein wenig von Schmutz, Gras, Blättern, Schnee ect. gereinigt, um eine stabile Aufstellung zu ermöglichen. Das Instrument ist vor Sonneneinstrahlung und Wind zu schützen. Für eine stabile Aufstellung haben sich auf den meisten Punkten die am Stativ angebrachten Nylonfüsse gegenüber den originalen Spitzen bewährt. Diese verhindern insbesondere auf Asphalt ein Einsinken während der Messungen. Bei stark unebenem Boden muss das hohe Stativ verwendet werden, was die Stabilität erheblich verringert und auch die Messung der Instrumentenhöhe erschwert.

Einige Operateure bzw. Operateurinnen empfehlen auch, das Instrument immer nach Norden auszurichten, um den Einfluss des Magnetfeldes auf die Messungen zu minimieren. Bei swisstopo wurde aber zumindest mit dem CG-5 kein solcher Einfluss festgestellt, und es wird deshalb bei der Positionierung des Gravimeters nicht auf dessen Orientierung geachtet.



Abbildung 10-1: Stationierung des CG-5. Nylonfüsse, Wind- und Sonnenschutz, hohes Stativ

Die eigentliche Messung erfolgt dann in Zyklen mit einer Länge von 30 bis 120 Sekunden und normalerweise werden auf einer Station 8–20 Zyklen gemessen.

10.4 Hysteresis

Begonnen wird die Messung bei swisstopo in der Regel direkt nach dem Horizontieren. Dies ist teilweise problematisch wegen Hysteresis-Effekten. Dies sind Relaxations-Effekte, welche nach dem Transport des Gravimeters auftreten können bis sich der Sensor stabilisiert hat. Die Messungen zeigen in dieser Zeit dann einen Trend, der nichts mit der eigentlichen Instrumentendrift zu tun hat und um ein Vielfaches grösser ist. Man müsste also eigentlich mit den Messungen warten, bis diese Hysteresis abgeklungen ist. Dies kann aber manchmal sehr lange dauern. Direkt nach dem Transport kann die Hysteresis mehrere Hundertstel mGal betragen. Da aber weder Vorzeichen, noch der Betrag, noch die Dauer konstant sind, macht dies eine Modellierung sehr schwierig bis unmöglich. Dieses Problem im LSN wurde gelöst, indem die Messungen solange wiederholt werden, bis die Resultate der einzelnen Messzyklen keinen eindeutigen Trend mehr zeigen, wobei ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Messdauer eingegangen werden muss. Die von Hysteresis betroffenen Messungen werden dann nicht für die Auswertung verwendet. Die Hysteresis ist sehr individuell für jedes Gravimeter. Während das CG-5 von ETHZ/swisstopo eine sehr starke Hysteresis zeigt, sind das CG-6 ebenso wie das CG-5 der Uni Lausanne praktisch frei von Hysteresis.

Ein Beispiel für Hysteresis ist in Abbildung 10-2 zu sehen. Für diese Darstellung wurde die Ablesung des letzten Cycles auf 0 gesetzt und die übrigen Cycles zeigen die Differenz zu diesem. Auf einigen Stationen beträgt die Hysteresis bis zu 0.05 mGal (es kann manchmal auch mehr sein), während sie auf anderen

kaum vorhanden ist. In diesem Beispiel hat sie zudem auf allen Stationen dasselbe Vorzeichen, was nicht immer der Fall ist.

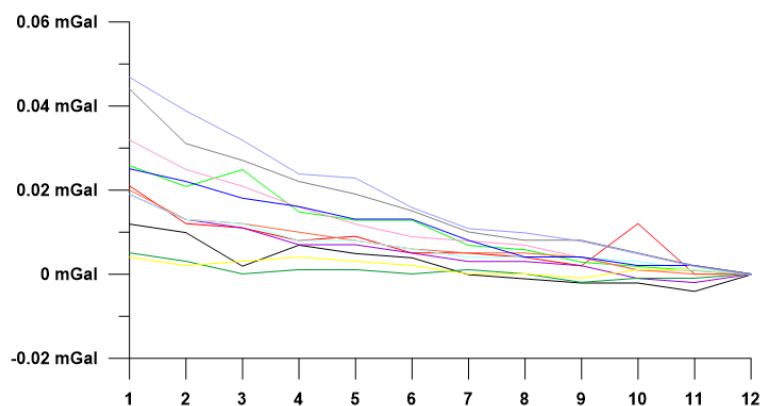


Abbildung 10-2: Beispiel von Hysterese an einem Messtag auf verschiedenen Stationen.

10.5 Instrumenten- und Sensorhöhe

Das Messen der Instrumentenhöhe ist vor allem bei Absolutmessungen wichtig, aber auch bei Relativmessungen verursachen unterschiedliche Instrumentenhöhen nicht vernachlässigbare Einflüsse. Ein Unterschied in der Instrumentenhöhe von 1 cm verursacht eine Korrektur von ca. 3 μ Gal. Deshalb sollte versucht werden, auch bei Relativmessungen die Instrumentenhöhe auf etwa 5 mm genau zu messen. Dies ist normalerweise auf einigermaßen ebenem Boden mit einem Doppelmeter gut erreichbar. Es ist dabei oft von Vorteil, das Instrument nicht exakt über dem Punkt zu zentrieren, sondern so zu platzieren, dass eine Kante des Instruments über den Punkt zu liegen kommt. Dies erleichtert das genaue Messen der Instrumentenhöhe. Der kleine horizontale Offset ist vernachlässigbar. Beim Platzieren des Instruments zentrisch auf dem Punkt kann das Messen mit einem kleinen Rollmeter nützlich sein. Bei einer exzentrischen Aufstellung (vor allem bei horizontal gesetzten HFP, aber auch bei Punkten in Schächten) muss neben der Instrumentenhöhe auch noch die Höhe des Referenzpunktes über/unter dem Aufstellpunkt gemessen werden. Dabei kann das Benutzen einer Wasserwaage nützlich sein. Weitere Hinweise zum exakten Messen der Instrumentenhöhe findet man in [Condamine, 2016] und [Marti und Condamine, 2021]. Beim Messen der Instrumentenhöhe im LSN wurde auf LV95-Punkten üblicherweise der Kappenbolzen-Deckel nicht entfernt. Die Instrumentenhöhe wurde auf die Oberfläche des Deckels gemessen.

Einige Operateure bzw. Operateurinnen ziehen es vor, die Instrumentenhöhe bis auf die Oberkante des Instruments zu messen, während andere bis zur Unterkante messen. Es ist deshalb wichtig zu notieren, wie gemessen wurde.

Bei einer sauberen Auswertung von Schweremessungen muss die gemessene Instrumentenhöhe noch auf die eigentliche Sensorhöhe des Gravimeters korrigiert werden. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn mehrere Gravimetertypen in einem Netz verwendet werden, wie dies im LSN der Fall ist.

Die exakte Sensorposition kann den Manuals der Hersteller entnommen werden. Für die wichtigsten im LSN verwendeten Instrumente wurden folgende Werte verwendet:

CG-3: 9.8 cm von unten

CG-5: 21.1 cm von oben, 8.9 cm von unten (in den ersten Versionen des Manuals war eine Position von 20.2 cm von oben angegeben).

CG-6: 6.3 cm von unten, 10.1 cm von oben (Fläche mit den Bedienknöpfen)

LCR: 12.5 cm von unten, 12.5 cm von oben

ZLS: 15.4 cm von oben

10.6 Korrekturen der Relativmessungen

Die wichtigste Korrektur an den Relativmessungen ist sicherlich die **Gezeitenkorrektur**, welche etwa bis zu 0.3 mGal betragen kann. Diese muss auf jeden Fall angebracht werden. Dabei ist es wichtig, dass sowohl die Messzeit als auch die ungefähre Position der Station bekannt sind. Um die Gezeitenkorrektur im μGal -Bereich zu ermöglichen, sollte die Zeit besser als etwa 1 Minute bekannt sein. Für die Position genügt eine Genauigkeit von etwa 50 km. Bei Messungen mit LCR-Gravimetern müssen die Gezeitenkorrekturen mit externen Programmen berechnet werden. Bei moderneren Gravimetern (CG-5, CG-6) ist das Anbringen der Gezeitenkorrektur direkt während der Messung möglich. Allerdings wird dabei ein relativ einfaches Modell von Longman (1959) verwendet, welches um bis etwa 5 μGal von einem besseren Modell abweichen kann. Es ist deshalb für höchste Präzision auch bei solchen Messungen von Vorteil, mit einem externen Programm (z.B. ETGTAB) bessere Korrekturen zu rechnen.

Die **Tiltkorrektur** berücksichtigt bei modernen Gravimetern eine nicht-perfekte Horizontierung des Gerätes. Dabei werden die Ablesungen der Neigungssensoren in Schwerekorrekturen umgerechnet. Damit dies gut funktioniert, muss das Gravimeter regelmässig kalibriert werden. Falls während einer Messung die Neigung ändert (z.B. Einsinken auf Asphalt) und gleichzeitig auch der registrierte Schwerewert ändert, so ist dies ein Hinweis auf ein schlecht kalibriertes Instrument.

Der Sensor eines Gravimeters muss sehr exakt auf immer dieselbe Temperatur geheizt werden. Kleine Abweichungen davon (im mK-Bereich) können mit einer **Temperaturkorrektur** berücksichtigt werden. Die Kalibration dazu lässt sich normalerweise nicht vom Benutzer selber durchführen.

Alle Relativgravimeter weisen eine mehr oder weniger starke Drift auf. Die **Driftkorrektur** erfolgt durch das Messen in geschlossenen Schleifen von möglichst kurzer Dauer. Eine mittlere Langzeitdrift kann beim CG-5 und beim CG-6 bereits während der Messung berücksichtigt werden. Der dazugehörige Kalibrationswert kann aus Permanentmessungen auf einer stabilen Station über mehrere Tage ermittelt werden.

Die Gravimeter werden mit einer Eich Tabelle ausgeliefert, mit welcher die Ablesungen (Trommeldrehungen, Spannungen an der Testmasse) in mGal umgerechnet werden. Für einige Gravimetertypen kann diese **Masstabskorrektur** auch nur eine Konstante über den gesamten Messbereich sein. Die Initialwerte dieser Skalenfaktoren werden vom Hersteller bestimmt. Diese Werte müssen aber regelmässig überprüft werden, da sie sich zeitlich ändern können. Dies geschieht auf einer Eichstrecke mit möglichst grossen und gut bekannten Schwereunterschieden. In der Schweiz steht dazu die Kalibrationslinie Interlaken–Jungfrauojoch [Marti, 2017; Marti et al. 2016] zur Verfügung. Informationen zum Skalenfaktor ergeben sich aber aus allen Messungen im LSN mit einem grösseren Schwereunterschied.

Andere Korrekturen, welche bei Absolutmessungen nötig sind, wie **Polschwankungen** oder **Druckkorrektur**, werden bei Relativmessungen üblicherweise nicht angebracht, da sie bei der Differenzbildung grösstenteils eliminiert werden.

10.7 Kalibration der Relativgravimeter

Damit das Gravimeter brauchbare Daten liefert, muss es regelmässig kalibriert werden. Die Benutzerinnen und Benutzer können die Drift, den Tilt und den Skalenfaktor selbst bestimmen, während die Temperaturkalibration nur in einem Labor durchgeführt werden kann. Aber natürlich sollte das Gravimeter immer auf der Solltemperatur betrieben werden.

10.7.1 Driftkalibration

Die Drift eines Gravimeters ist vor allem verursacht durch das Nachlassen der Spannung der Messfeder (oder des Messsensors im Allgemeinen) mit der Zeit. Das heisst, dass die Nulllage über längere Zeit nicht stabil ist. Quarzsensoren haben tendenziell eine grössere Drift als Metallfedern. Bei längerem Gebrauch des Gravimeters nimmt die Drift üblicherweise ab. Die Drift kann aber auch von äusseren Einflüssen abhängen, wie Aussentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck oder Spannungsschwankungen der Stromversorgung [Lederer, 2009]. Die Ruhedrift eines Gravimeters ist über einige Tage ziemlich konstant, kann aber bei Feldeinsätzen auch unregelmässiger sein. Transport und Erschütterungen können die Konstanz der Drift negativ beeinflussen. Die Ruhedrift wird durch mehrtägige Permanentmessungen auf einer Station bestimmt. Die Drifts während eines Feldeinsatzes wird durch geeignete Messverfahren kontrolliert. Das wichtigste davon ist das Messen in geschlossenen Schleifen.

Wann immer die Gravimeter bei swisstopo nicht für Feldmessungen benutzt werden, werden damit permanente Messungen durchgeführt. Dies ergibt eine sehr zuverlässige Bestimmung der Ruhedrift. Über mehrere Tage kann die Drift als linear betrachtet werden, über mehrere Monate aber nicht mehr. Zwei Beispiele für solche Permanentmessungen sind hier gezeigt (Abbildung 10-3 und Abbildung 10-4). Einzelne unregelmässige Abschnitte zeigen Erdbeben und sonstige Erschütterungen. Der kleine Abschnitt Mitte Februar in Abbildung 10-4 mit einem Offset ist ein Zeitraum, in welchem das Instrument nicht horizontalisiert war. Weitere Beispiele von Permanentmessungen sind in [Marti und Condamin, 2021] zu finden, vor allem für das CG-6, welches eine viel kleinere und konstantere Ruhedrift aufweist als das CG-5.

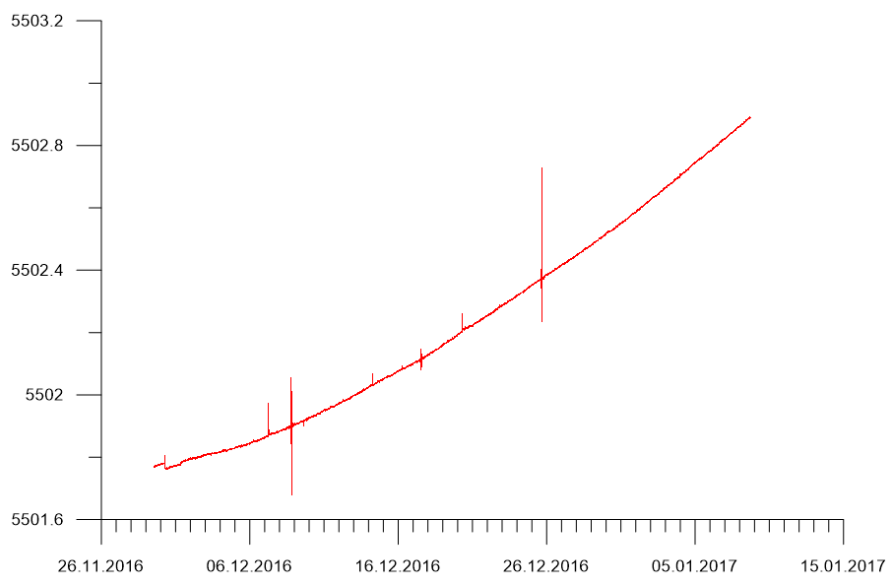


Abbildung 10-3: Permanentmessungen mit dem CG-5, November 2016 – Januar 2017

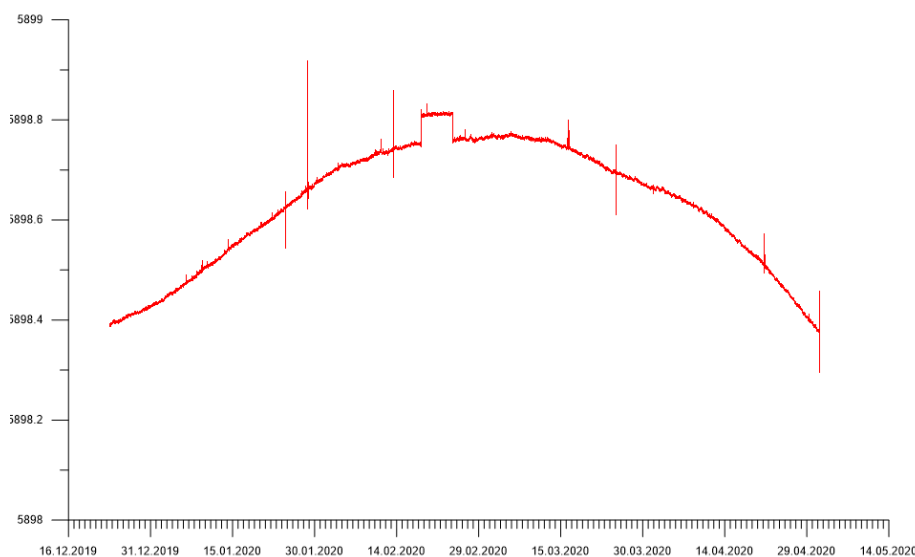


Abbildung 10-4: Permanentmessungen mit dem CG-5, Dezember 2019 – Mai 2020

Alle aus Permanentmessungen bestimmten täglichen Drifts seit 2011 sind in Abbildung 10-5 in Schwarz dargestellt. Sie sind nicht ganz konstant, bewegen sich aber meistens zwischen 0.3 und 0.4 mGal/Tag. Eine Abnahme der Drift mit der Zeit ist dabei nicht zu sehen. In Rot sind die Daten aus den vorherigen Abbildungen hervorgehoben. Zum Vergleich sind in Grün auch noch die berechneten Drifts aus den Feldkampagnen dargestellt. Meistens haben sie mit der Ruhedrift nicht sehr viel gemeinsam. Zudem sind sie fast immer kleiner. Eine Erklärung dafür konnte bisher nicht gefunden werden.

Die Unregelmässigkeit der Kampagnendrifts macht natürlich eine saubere Driftkalibration und deren Berücksichtigung bereits während der Messungen ziemlich fragwürdig. Deshalb wird der Kalibrationswert auf dem CG-5 nur sehr selten (alle paar Jahre) angepasst.

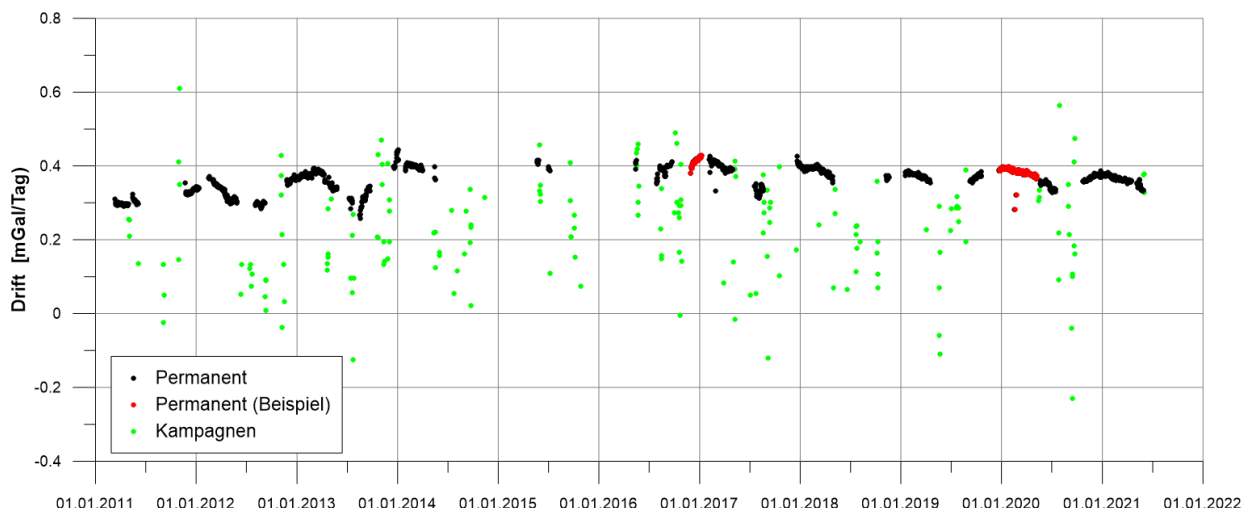


Abbildung 10-5: Drifts des CG-5. Schwarz und Rot aus Permanentmessungen, Grün aus Feldmessungen

In Abbildung 10-6 ist dasselbe noch für das CG-6 dargestellt. Man beachte den grossen Unterschied im Masstab gegenüber Abbildung 10-5. Die Drifts des CG-6 sind deutlich kleiner als beim CG-5. Nach einer kurzen Einspielphase zu Beginn sind die Ruhedrifts enorm stabil mit einer leicht gegen Null gehenden Tendenz. Auch die aus den Feldmessungen bestimmten Drifts sind viel kleiner als beim CG-5 und entsprechen den Ruhedrifts etwas besser als beim CG-5. Der Hersteller empfiehlt, im Feldeinsatz keine vorberechnete Driftkorrektur anzubringen. Dies kann durch unsere Beobachtungen bestätigt werden. Deshalb bringt eine häufige Driftkalibration auch beim CG-6 keinen Vorteil.

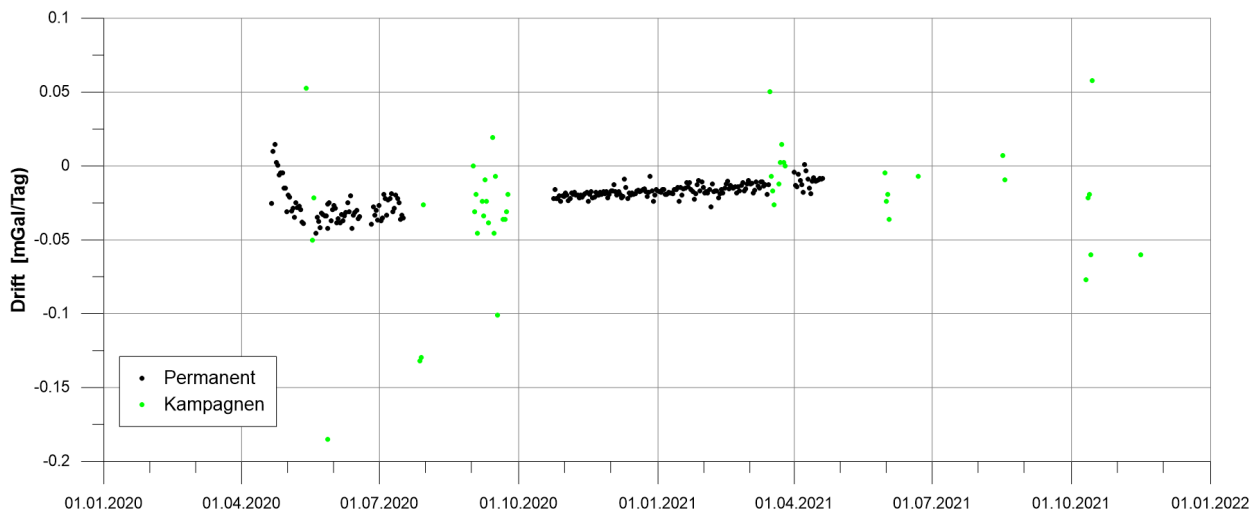


Abbildung 10-6: Drifts des CG-6. Schwarz aus Permanentmessungen, Grün aus Feldmessungen

10.7.2 Tiltkalibration

Falls ein Gravimeter nicht perfekt horizontalisiert ist, so wird nicht der volle Betrag des Schwerevektors gemessen, sondern nur ein Teil davon. Die gemessene Schwere ist also immer zu klein. Der Einfluss der Schiefe auf die Schwere dg ist

$$dg = (1 - \cos(X) * \cos(Y)) * g$$

wobei X und Y die Neigungen in Längs- und Quer-Richtung sind und g der Schwerewert am Punkt (eine grobe Näherung genügt dafür). Vernachlässigen lässt sich diese Korrektur nur für sehr kleine Neigungen von etwa 10 bis 20 Bogensekunden.

Moderne Gravimeter sind mit Neigungssensoren ausgerüstet, welche die tatsächlich vorhandenen Neigungen messen können, und die Korrektur wird direkt im Feld angebracht. Nun ist es aber so, dass die von den Neigungssensoren gelieferten Werte nicht unbedingt korrekt sind, sondern von deren Kalibrationswerten abhängen. Dies sind einerseits die Nullposition (Offset) und andererseits ein Skalenfaktor. Dies

ergibt für die beiden Neigungsmesser insgesamt vier Kalibrationswerte, welche regelmässig überprüft werden müssen. Dazu gibt es sowohl auf dem CG-5 als auch auf dem CG-6 vorbereitete Messprogramme. Bei diesen wird das Gravimeter in verschiedenen schiefen Positionen aufgestellt, und aus den registrierten Schwerewerten lassen sich dann die Kalibrationswerte berechnen.

Falls bei Feldmessungen auf Stationen mit Einsinken mit der Zunahme der Neigung auch der Schwerewert ändert, so ist dies ein Hinweis auf ein schlecht kalibriertes Instrument. Bei gut kalibrierten Instrumenten sollte der registrierte Schwerewert auch bei Neigungen von bis zu 50 oder sogar 100 Bogensekunden kaum ändern. Die höchste Genauigkeit wird aber bei Neigungen von weniger als 10 Bogensekunden erreicht. Dieser Wert sollte möglichst auch bei Messungen im Feld eingehalten werden.

Da die Kalibrierwerte der Neigungsmesser nicht unbedingt über längere Zeit stabil sind, empfiehlt sich eine Neukalibration vor jeder grösseren Messkampagne. Diese dauert etwa 10 Minuten.

Eine Übersicht der Kalibrationswerte ist in den folgenden Grafiken für das CG-5 (Abbildung 10-7) und das CG-6 (Abbildung 10-8) gegeben. Die Einheiten der Werte sind nicht besonders wichtig. Es handelt sich dabei um Grössen, welche die Umrechnung von internen Sensorwerten in Bogensekunden erlauben. Es geht hier mehr um die Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Werte. Die Skalenfaktoren der beiden Instrumente sind über längere Zeit recht konstant und verursachen keine grösseren Probleme. Auch die Nullpunktlage (Offset) des CG-5 ist relativ konstant. Beim CG-6 jedoch verursachte die Veränderlichkeit der Nullpunktlage zu Beginn einige Probleme. Inzwischen scheint sich aber auch dies ziemlich stabilisiert zu haben.

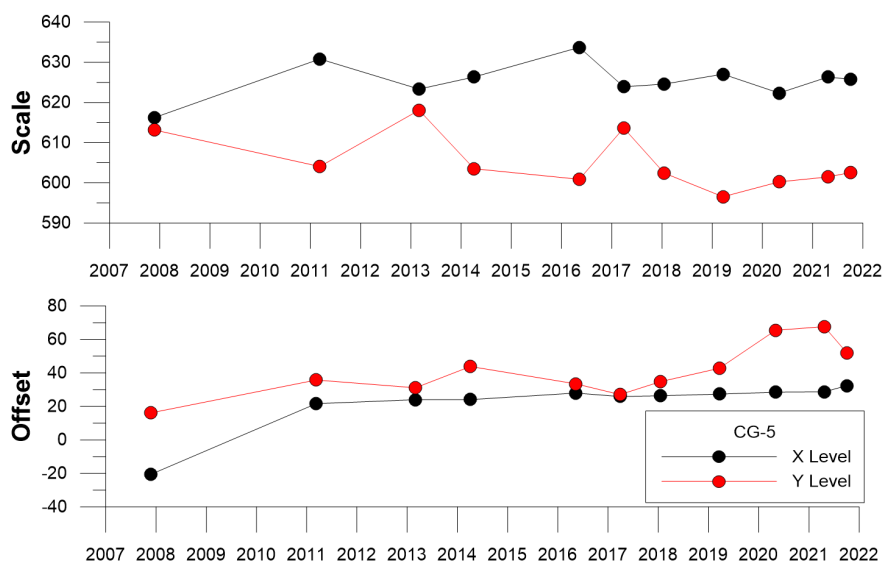


Abbildung 10-7: Tilt-Kalibrationswerte für das CG-5

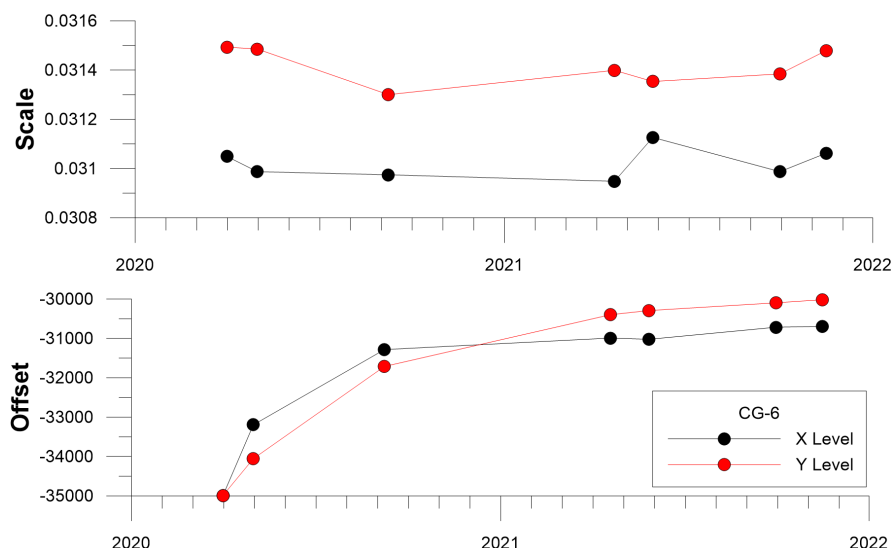


Abbildung 10-8: Tilt-Kalibrationswerte für das CG-6

Mit einem schlecht kalibrierten Instrument gemessene Schweren lassen sich nachträglich mit einigem Aufwand noch korrigieren. Dabei werden die registrierten Neigungswerte zunächst mit den falschen Kalibrationswerten zurück auf die eigentlichen Sensorwerte gerechnet und dann mit den besseren Werten wieder auf die tatsächlich vorhandenen Neigungen, welche dann zur Tiltkorrektur verwendet werden. Ein Beispiel dafür ist in der folgenden Abbildung 10-9 für einen Punkt in Landquart mit dem CG-6 gegeben. Diese Messungen fanden auf Asphalt bei Sonnenschein statt und waren deshalb stark von Einsinken betroffen (bis ca. 60 Bogensekunden). Die registrierten Schwerewerte der 12 Messzyklen zeigten ein starkes Wegdriften von mehr als 0.1 mGal. Dies war ein Hinweis auf eine schlechte Tiltkalibration. Eine neue Kalibration wurde dann am Abend durchgeführt und die Messungen wurden nachträglich korrigiert. Danach streuten die einzelnen Messwerte nur noch im zu erwartenden Bereich.

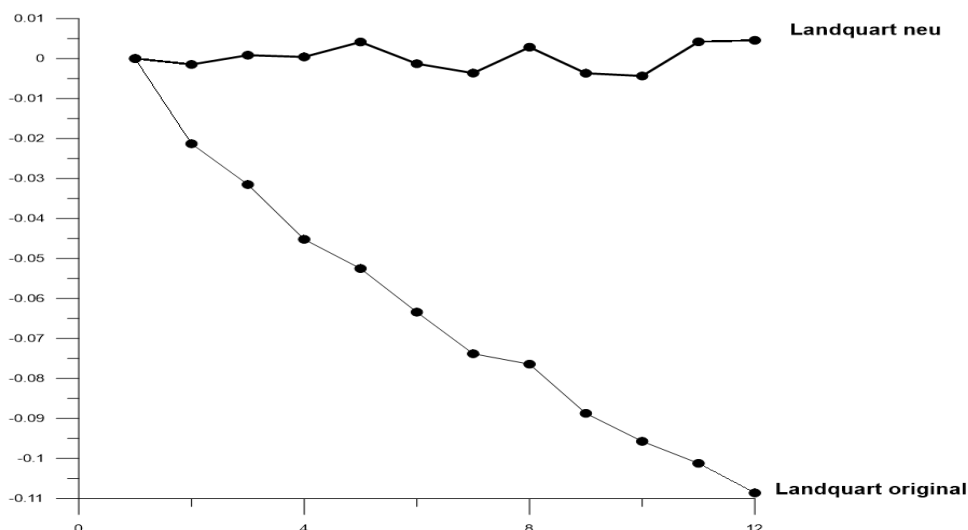


Abbildung 10-9: Unkorrigierte (original) und nach Tilt-Kalibration korrigierte Messungen (neu) in Landquart. (Differenzen in mGal gegenüber dem ersten Mess-Zyklus)

Ein weiteres Beispiel für den Einfluss eines schlecht kalibrierten Instruments auf die Messungen ist in Abbildung 10-10 gegeben. Nach Anbringen der verbesserten Tiltkorrektur werden die Teildrifts zwischen wiederholt gemessenen Stationen deutlich konsistenter.

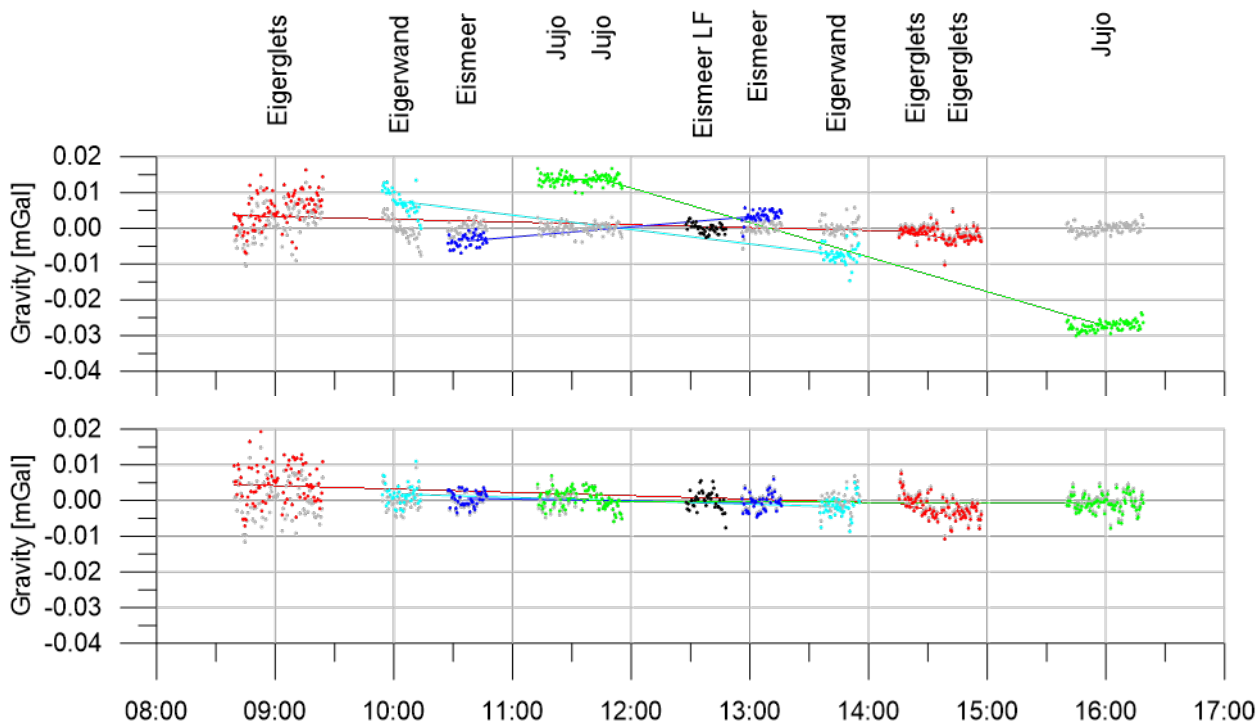


Abbildung 10-10: Rohdaten des CG-6 vom 28. Juli 2020 vor und nach der Tilt-Korrektur

10.7.3 Skalenfaktor

Die ursprünglichen Messungen des Schweresensors (Spannungen, Trommeldrehungen) müssen mit einem Skalenfaktor multipliziert werden, um auf die Einheit mGal zu kommen. Dazu dienen Eich Tabellen, welche vom Hersteller stammen. Für die LCR-Gravimeter (Typ G) wird alle 100 Trommeldrehungen ein Faktor ausgegeben, welcher im Labor bestimmt wurde. Als Beispiel solcher Eichkurven ist in Abbildung 10-11 das Verhalten des LCR-G317 und des LCR-G514 der ETH Zürich grafisch dargestellt. Die Kurve ist charakteristisch für jedes individuelle Instrument.

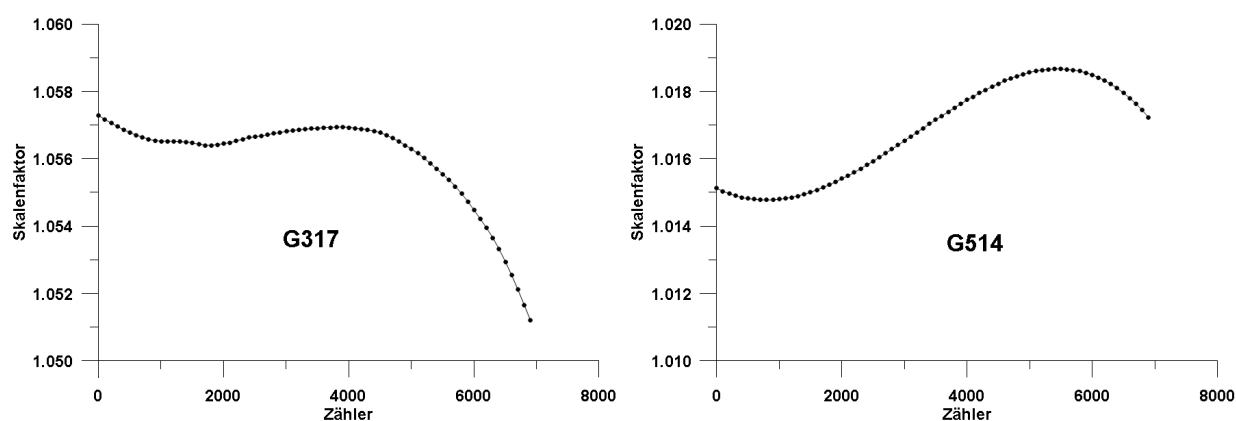


Abbildung 10-11: Variable Skalenfaktoren für zwei LCR-Gravimeter (G317 und G514) der ETH Zürich

Bei moderneren Gravimetern von Scintrex genügt ein einziger Skalenfaktor für den ganzen Messbereich von ca. 7000 mGal. Der initiale Faktor wird auf einer Kalibrationsstrecke in Kanada mit einer Schwere-differenz von etwa 119 mGal bestimmt. Ein eventuell vorhandener quadratischer Anteil wird elektronisch kompensiert.

Eine regelmässige Überprüfung dieses Skalenfaktors durch die benutzende Person ist aber nötig, um auch zeitliche Veränderungen der Kalibrationswerte festzustellen und das Instrument auf die Benutzung im eigenen Messgebiet zu optimieren.

Für die Überprüfung muss die Schweredifferenz zwischen mindestens zwei gut bekannten Punkten mit einer möglichst grossen Schweredifferenz gemessen werden. Idealerweise sind diese Punkte mit einem Absolutgravimeter beobachtet worden. In der Schweiz dient dazu in erster Linie die Kalibrationsstrecke zwischen Interlaken und dem Jungfrauoch, welche aus sieben Absolutstationen besteht und einen totalen Schwereunterschied von mehr als 600 mGal aufweist. Durch die grosse Anzahl von Absolutstationen lassen sich eventuell auch nichtlineare Anteile der Skalenfaktoren bestimmen. Mehr zur Einrichtung und zu den ersten Resultaten auf der Eichstrecke sind in Marti (2017) zu finden.

Neben den Messungen auf der Kalibrationslinie liefert aber auch jede Messung im LSN mit einem grösseren Schwereunterschied Informationen über den Skalenfaktor, welcher dann in der Gesamtausgleichung als Unbekannte eingeführt wird und in der Regel aus einer grösseren Messkampagne zuverlässig bestimmt werden kann. In der Regel wird in der Gesamtausgleichung des LSN ein unbekannter Skalenfaktor pro Kalenderjahr und Instrument eingeführt.

Für das LSN selber ist also eine gute Kalibration des Instruments nicht unbedingt nötig, da der Massstab aus den Messungen berechnet werden kann. Für andere gravimetrische Messkampagnen ist es aber trotzdem sinnvoll, dass das Instrument direkt Schweredifferenzen in mGal liefert – weshalb der Kalibrationswert doch ab und zu angepasst werden sollte. Das Ziel ist, den Skalenfaktor mit einer Genauigkeit von besser als 100 ppm zu kennen. Dies ergäbe bei einer Schweredifferenz von 100 mGal (ca. 300 Meter Höhendifferenz) einen Fehler von 0.01 mGal.

In der folgenden Abbildung 10-12 ist die zeitliche Entwicklung des Skalenfaktors des CG-5 dargestellt. Als Basis (Scale=0) dient dabei der seit Beginn 2019 im Instrument eingestellte Wert. Die schwarzen Punkte sind die in der Gesamtausgleichung bestimmten Skalenfaktoren zusammen mit ihren Standardabweichungen (rote Fehlerbalken). Die grüne Kurve zeigt den im Instrument eingestellten Kalibrationswert (vor 2011 ist dieser unsicher). Zu Beginn zeigte das CG-5 eine starke Abnahme des Massstabs. Dann war er für eine lange Zeit ziemlich stabil mit einer weiteren, leichten Tendenz zur Abnahme. Seit 2020 zeigt sich wieder eine verstärkte Abnahme. 2021 ist der Skalenfaktor bei etwa -123 ppm gegenüber dem eingestellten Wert angelangt.

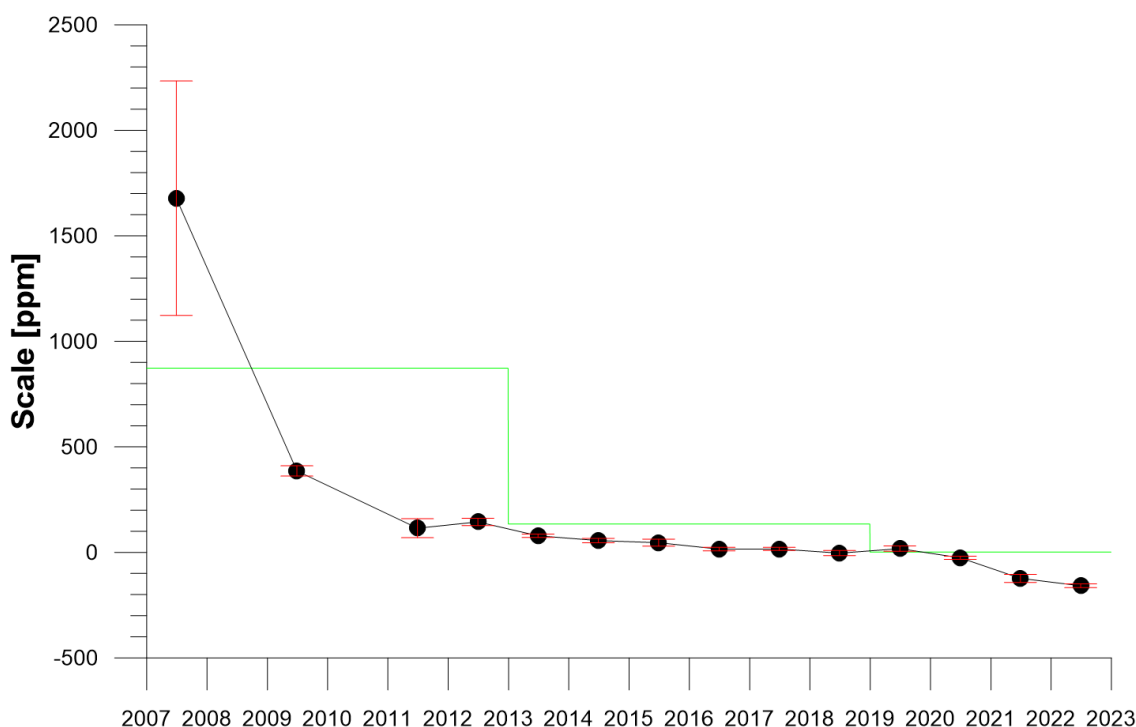


Abbildung 10-12: Zeitliche Entwicklung des Skalenfaktors des CG-5

Die ersten Messungen mit dem CG-6 zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Skalenfaktor, wie er von Scintrex bestimmt wurde. Aber insbesondere die Messungen vom Herbst 2021 passten dann sehr schlecht zu den früheren Messungen. Es zeigte sich, dass dies die Folge eines stark veränderten Skalenfaktors war. Dieser wuchs im Verlauf von 2021 stark an und erreichte im Herbst dann fast 1000 ppm. Dieses Verhalten machte es dann auch nötig, dass erstmals im LSN mehr als ein Skalenfaktor pro Jahr und

Instrument in die Ausgleichung eingeführt werden musste. Schliesslich wurde für jede grössere Messkampagne ein separater Massstab geschätzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10-13 dargestellt. Bei einer Testmessung im November 2021 (von Neuchâtel auf den Chasseral) wurde dann der Massstab wieder kleiner (ca. 550 ppm). Wegen der geringen Anzahl Messungen ist dieser Wert allerdings relativ unsicher. Die Messungen auf der Eichstrecke Jungfrauoch von Mai 2022 zeigten dann aber doch weiterhin eine sehr starke Abnahme. Der Kalibrationswert auf dem Instrument wurde bisher nicht verändert, muss aber sicherlich weiterhin überwacht werden.

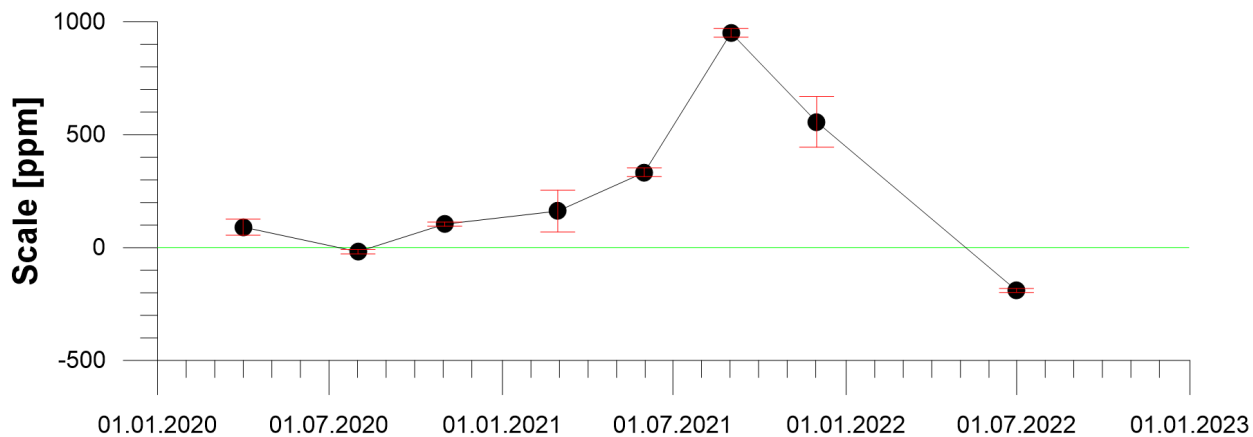


Abbildung 10-13: Zeitliche Entwicklung des Skalenfaktors des CG-6

11 Vertikalgradienten

Die Vertikalgradienten der Schwere (VGG, Vertical Gravity Gradient) sind insbesondere bei der Reduktion von Absolutmessungen auf den Boden wichtig. Wegen der hohen Instrumentenhöhe (ca. 130 cm) beim FG5 wirkt sich ein kleiner Fehler des VGG stark auf den reduzierten Wert aus. Deshalb genügt es nicht, einfach den Standardgradienten von 0.3086 mGal/m zu verwenden. Zudem liegen die Absolutstationen normalerweise innerhalb von Gebäuden, wo sehr anomale Gradienten vorhanden sein können. Deshalb muss auf Absolutstationen der VGG immer gemessen werden.

Bei Relativmessungen ist der VGG wegen der geringen Instrumentenhöhe weniger kritisch. Zudem ist dieser bei der Verwendung immer desselben Instrumententyps innerhalb von wenigen cm immer gleich und Fehler im VGG wirken sich nicht sehr stark auf den ausgeglichenen Wert aus. Aber auch bei Relativmessungen verursacht die Abweichung vom Standardgradienten eine kleine Schwereänderung von einigen Hundertstel-mGal. Bis heute liegen allerdings nur auf sehr wenigen Relativpunkten des LSN gemessene VGG vor. Deshalb musste eine geeignete Methode entwickelt werden, um diese VGG aus Massenmodellen zu berechnen.

11.1 Messen von Vertikalgradienten

Auf den Absolutstationen ist das Messen des VGG vorgeschrieben, um die Genauigkeit des auf den Boden reduzierten Wertes – und damit auch des Gesamtnetzes – zu garantieren. Diese Messungen haben mit höchster Genauigkeit zu erfolgen, um eine Standardabweichung des VGG in einer Grössenordnung von 1 μ Gal/m zu erhalten. In einigen Ländern wird als Alternative zur Messung des VGG in der Ausgleichung des Netzes eine Lösung gewählt, bei welcher zwei unterschiedliche Punkte (auf Höhe der Absolutmessung und am Boden) eingeführt werden. Der Schwereunterschied zwischen diesen beiden Punkten muss allerdings dann ebenfalls mit grosser Genauigkeit bestimmt werden.

Für die Messung auf den Absolutstationen steht ein vom METAS konstruiertes Spezialstativ zur Verfügung, welches die Messung auf drei Höhenstufen erlaubt (siehe Abbildung 10-1). Später wurde durch swisstopo das Messen auf zwei weiteren Höhenstufen ermöglicht. Die VGG wurden auf allen Absolutstationen nach dem Standardverfahren des METAS gemessen. Das heisst, dass mit dem Spezialstativ auf drei verschiedenen Instrumentenhöhen von ca. 0, 80 und 130 cm Relativmessungen durchgeführt wurden. Die folgende Messsequenz wurde auf allen Stationen beibehalten: 0 (Boden) – 1 (Mitte) – 0 – 2 (Oben) – 0 – 1 – 2 – 1 – 0 – 2 – 0. Auf jeder Höhenstufe wurden mehrere Messungen durchgeführt. Dies führt zu einer sehr guten Überbestimmung und zu einer zuverlässigen Bestimmung von Gradienten und Drifts.

Die älteren Gradientenmessungen für das LSN wurden jeweils durch das METAS selbst mit deren CG-3M durchgeführt. Später kamen dann auch andere Instrumente zum Einsatz, insbesondere das ZLS Burris der BAdW auf der Eichstrecke Jungfrauoch und das CG-5 von ETHZ/swisstopo.

Die Gradientenmessungen wurden nicht bei jeder Absolutmessung wiederholt. Nur bei Hinweisen auf eine schlechte Erstmessung oder bei baulichen Veränderungen wurde eine Neumessung durchgeführt.



Abbildung 11-1: Gradientenmessung in Brig mit dem Stativ des METAS und dem Scintrex CG-3M

Auf den Relativpunkten 1. und 2. Ordnung wurden nur ausnahmsweise Gradientenmessungen durchgeführt, die allermeisten davon in einer Masterarbeit der FHNW [Condamin, 2016]. Dabei wurden meist vereinfachte Messverfahren eingesetzt. Oft gebraucht wurde 0 – 1 – 2 – 0 oder auch nur 0 – 1 – 0. Für die Höhenstufe 1 wurde dabei das hohe Gravimeterstativ benutzt, für die Höhenstufe 2 ein normales Vermessungsstativ. Nur in Ausnahmefällen wurde das Spezialstativ des METAS auch auf Relativpunkten eingesetzt.

11.2 Auswertung der Gradientenmessungen

Die Auswertung aller Gradientenmessungen erfolgt durch swisstopo mit der internen Software GRADIENT durch eine vermittelnde Ausgleichung nach kleinsten Quadraten. Als Unbekannte werden Drift- und Gradientenparameter geschätzt. Die einfachste Form der Beobachtungsgleichungen sieht folgendermassen aus:

$$r = C + (t - t_0) \cdot d + h \cdot g$$

Dabei ist r die um den Einfluss der Erdzeiten und der Skalenfaktoren aus den Eich Tabellen korrigierte Ablesung des Gravimeters; C ist der Offset der Ablesung; t ist der Ablesezeit der Messung; t_0 ist eine beliebige Referenzzeit (bei unseren Auswertungen immer erster Ablesezeitpunkt); d ist die lineare Drift; h ist die Instrumentenhöhe; g ist der Vertikalgradient der Schwere. In dieser Auswertung haben wir also die drei Unbekannten C , d und g .

Um zu untersuchen, ob der Gradient im Messbereich konstant ist, wird in einer zweiten Ausgleichung auch ein quadratischer Term g' des Gradienten bestimmt, falls auf mindestens drei Höhenstufen gemessen wurde. Die Beobachtungsgleichungen haben dann die Form:

$$r = C + (t - t_0) \cdot d + h \cdot g + h^2 \cdot g'$$

mit der zusätzlichen Unbekannten g' , welche einer mit der Höhe linearen Änderung des Schweregradienten ($\partial g / \partial h$) entspricht.

Und schliesslich wird noch eine dritte Ausgleichung durchgeführt, bei welcher die einzelnen Höhenstufen wie unterschiedliche Punkte behandelt werden. Diese Ausgleichung ist analog zu einer Auswertung von Relativmessungen. Als Unbekannte treten neben der Drift die Schwereunterschiede der einzelnen Höhenstufen zum untersten Punkt auf. Anschliessend kann durch die ausgeglichenen Punkte eine beliebige Funktion zur Modellierung des Gradienten gelegt werden.

Die Verbesserungen an den Beobachtungen werden bei jeder der Ausgleichungen (linear, quadratisch, Höhenstufen) immer kleiner, falls auf mehr als drei Höhenstufen gemessen wurde. Falls dies aber keine wesentliche Veränderung bewirkt, so darf der VGG als konstant angenommen werden. Dies ist allerdings nicht auf allen Stationen streng der Fall (siehe Beispiel Ofenpass in Abbildung 11-2).

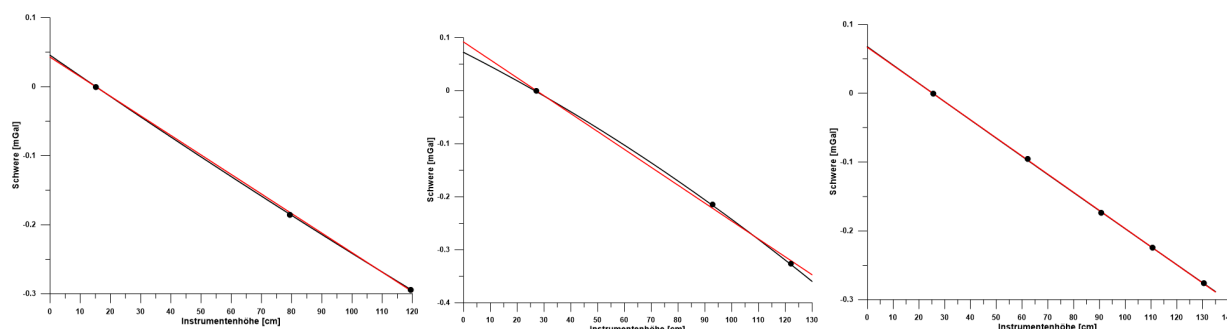


Abbildung 11-2: Beispiele von Gradienten: Monte Ceneri (links), Ofenpass (Mitte), Aarburg (rechts)

Obwohl auf einigen Stationen nichtlineare Veränderlichkeit der Schwere mit der Höhe festgestellt wurde, wird für die Gesamtausgleichung des LSN überall ein konstanter linearer VGG verwendet, welcher für die Absolutmessungen repräsentativ ist. Strenggenommen müsste aber für Absolut und für Relativmessungen in diesem Fall ein unterschiedlicher VGG verwendet werden.

Tabelle 11-1 enthält die Zusammenstellung der auf den Absolutstationen durchgeführten Gradientenmessungen. Der ausgewiesene VGG stammt aus der Ausgleichung mit konstantem VGG. Der angegebene quadratische Anteil ist als Hinweis zu verstehen, wo ein nicht-konstanter Gradient vorhanden sein könnte. Die grössten Werte treten auf dem Jungfrauoch, in Zimmerwald und auf dem Monte Ceneri auf. Als Beispiel ist in Abbildung 11-2 der Monte Ceneri dargestellt. Dort ist aber der quadratische Anteil kaum zu sehen, obwohl er in der Ausgleichung signifikant bestimmt wurde.

Tabelle 11-1: Gemessene Schweregradienten auf den Absolutstationen und deren Exzentren

Station	LSN Nr.	Datum	VGG [mGal/m]	RMS	Quad. [mGal/m ²]	Instrument
Zimmerwald	0001.0	15.03.2004	-0.2583	0.0028	0.0130	CG-5
Zimmerwald	0001.0	11.05.2004	-0.2606	0.0004	0.0052	CG-3M
Zimmerwald	0001.0	10.10.2006	-0.2685	0.0015	0.0095	CG-3M
Zimmerwald	0001.0	21.06.2007	-0.2609	0.0010		CG-3M
Zimmerwald	0001.0	04.04.2019	-0.2571	0.0014	0.0160	CG-5
ETH Zürich	0002.0	08.06.1978	-0.2580	0.0030		LCR
ETH Zürich	0002.0	15.06.1994	-0.2488	0.0050		LCR
ETH Zürich	0002.0	18.05.2009	-0.2625	0.0005	0.0050	CG-3M
EPF Lausanne	0003.0	09.06.1994	-0.2518	0.0050		LCR
EPF Lausanne	0003.0	15.05.2009	-0.2548	0.0006	0.0009	CG-3M
METAS WANA	0004.0	25.07.2002	-0.2870	0.0005	0.0033	CG-3M
METAS WANB	0004.1		-0.2927	0.0009		CG-3M
METAS WANB	0004.1	15.03.2004	-0.2897	0.0014	-0.0143	CG-5
METAS WANO	0004.2		-0.2970	0.0030		CG-3M
METAS ZA13	0004.4	08.05.2009	-0.3055	0.0030	-0.0025	CG-3M
METAS WANC	0004.5		-0.2897	0.0030		CG-3M
METAS WAND	0004.6		-0.2894	0.0030		CG-3M
Basel	0005.0	28.03.2006	-0.2571	0.0010	0.0051	CG-3M
Brig	0006.0	06.07.2005	-0.2385	0.0003	-0.0005	CG-3M
Andermatt	0007.0	15.04.2008	-0.1489	0.0007	0.0053	CG-3M
Andermatt	0007.0	25.10.2016	-0.1525	0.0004	0.0053	CG-5
Monte Ceneri	0008.0	17.06.1994	-0.2799	0.0050		LCR
Monte Ceneri	0008.0	19.05.2010	-0.2833	0.0011	0.0151	CG-3M
Chur	0009.0	15.06.1978	-0.2060	0.0040		LCR
Chur	0009.0	20.06.1994	-0.1932	0.0040		LCR
Chur	0009.0	24.06.2013	-0.1947	0.0014	0.0050	CG-3M

Station	LSN Nr.	Datum	VGG [mGal/m]	RMS	Quad. [mGal/m ²]	Instrument
Zernez	0010.0	15.04.2008	-0.2299	0.0006	-0.0004	CG-3M
Zernez	0010.0	27.10.2016	-0.2261	0.0004	0.0010	CG-5
Pratteln	0011.0	13.06.1994	-0.2766	0.0050		LCR
Interlaken	0012.2	11.05.2015	-0.2564	0.0004	0.0020	CG-5
Jungfrauoch	0013.2	23.10.2013	-0.3972	0.0012	-0.0014	ZLS
Jungfrauoch	0013.2	30.07.2020	-0.3990	0.0008	0.0281	CG-6
Sphinx	0013.7	29.07.2020	-0.4570	0.0024	-0.0156	CG-6
Mont Terri	0016.0	21.08.2009	-0.2517	0.0007	0.0069	CG-3M
Mont Terri	0016.0	16.03.2021	-0.2571	0.0003	0.0055	CG-6
CERN LHCB	0017.0	29.06.2009	-0.1780	0.0030		CG-5
CERN PREV	0017.1	28.06.2009	-0.2580	0.0030		CG-5
CERN PREV	0017.1	06.09.2017	-0.2391	0.0030		CG-5
CERN Pt4	0017.2	27.06.2009	-0.2980	0.0030		CG-5
CERN Pt4	0017.2	06.09.2017	-0.2746	0.0030		CG-5
Alpiglen	0018.0	14.09.2010	-0.2926	0.0006	-0.0018	CG-3M
Grindelwald	0019.0	13.09.2010	-0.1450	0.0006	0.0106	CG-3M
Kleine Scheidegg	0020.0	22.10.2013	-0.2859	0.0011	0.0087	ZLS
Eigergletscher	0021.0	22.10.2013	-0.3091	0.0010	-0.0037	ZLS
Eigerwand	0022.0	22.10.2013	-0.3591	0.0025	-0.0067	ZLS
Eigerwand Fenster	0022.4	22.10.2013	-0.3585	0.0027	-0.0330	ZLS

11.3 Interpolation des Vertikalgradienten aus Massen

Auf den meisten Punkten des LSN wurden keine VGG gemessen. Um aber auch auf diesen etwas Besseres als den Standardgradienten verwenden zu können, muss ein geeignetes Interpolationsverfahren benutzt werden.

Der VGG ist in erster Linie verursacht durch den Normalanteil des Schwerfeldes (Freiluftgradient). Dieser beträgt 0.3086 mGal/m. Unterhalb der Erdoberfläche (Tunnel) beträgt der Standardgradient wegen den darüber liegenden Massen nur etwa 0.1 mGal/m. Abweichungen davon sind vor allem von der Form der Topografie abhängig. Die grössten Werte findet man auf Berggipfeln und Graten (bis zu mehr als 0.5 mGal/m), während die kleinsten Werte in engen Tälern auftreten (unter 0.1 mGal/m).

Zur Voraussage des VGG wird mit dem Programm QUAWIRK der Einfluss des Normalfeldes und der Topografie (bisher mit der Standarddichte 2.67 gcm⁻³) auf Höhe des Punktes (auf die Höhe des DHM verschoben) und 1 Meter darüber berechnet. Die Differenz der beiden Werte ergibt direkt den VGG. Dieses Verfahren funktioniert recht gut bei Punkten direkt an der Erdoberfläche. Bei Punkten in Gebäuden oder Tunneln ergibt es normalerweise keine brauchbaren Resultate.

Der VGG zeigt eine sehr hochfrequente Verteilung. Deshalb muss für seine Berechnung ein möglichst hochauflösendes DHM verwendet werden. Für unsere aktuellsten Berechnungen wurde SwissAlti3D mit einer Auflösung von zwei Metern verwendet. Bei einer geringeren Auflösung (z.B. 25 Meter) wird die Berechnung rasch schlechter. Dies ist auch in der folgenden Abbildung 11-3 ersichtlich, wo sich das generelle Bild innerhalb der Schweiz gegenüber dem benachbarten Ausland (kein SwissAlti3D vorhanden) ändert.

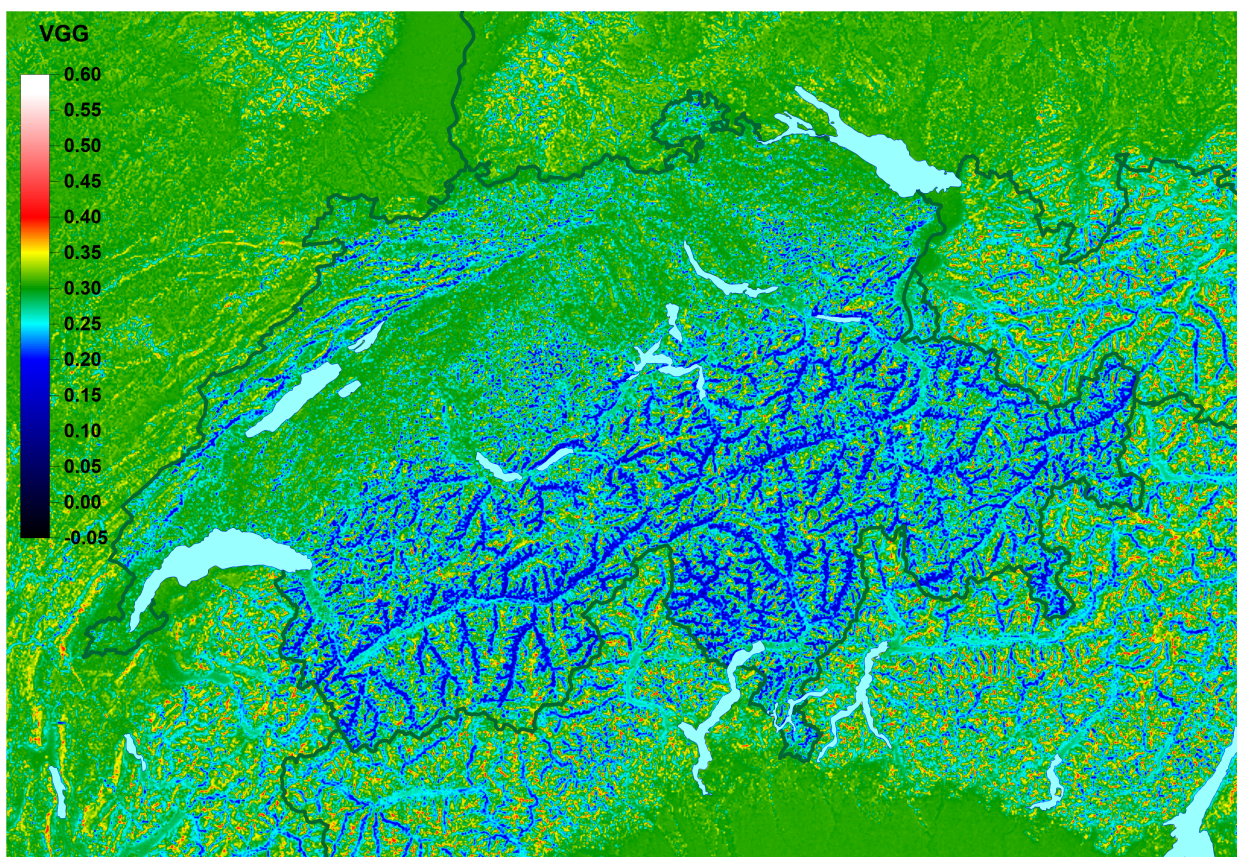


Abbildung 11-3: Berechnete Vertikalgradienten in einem 500m-Raster (mGal/m)

Die extremsten, aus SwissAlti3D interpolierten VGG auf LSN-Punkten befinden sich auf dem Jungfrauoch (Sphinx) mit einem Wert von 0.52 mGal/m sowie in Goppenstein (0.04 mGal/m, direkt am Tunnelportal).

Der Vergleich der interpolierten mit den gemessenen Gradienten ist in der folgenden Tabelle 11-2 zusammengefasst. Die meisten dieser Messungen stammen aus der Arbeit von Condamin (2016). Einige Punkte in der Westschweiz (Versoix, Bossy) wurden 2017 im Vermessungskurs der ETH Zürich (GPC) [Cotugno und Duewell, 2017] mit einem vereinfachten Verfahren beobachtet. Ebenfalls aufgelistet ist die Station «Sphinx» auf dem Jungfrauoch, welche 2020 mit dem CG-6 gemessen wurde.

Die Werte in Tabelle 11-2 sind für die Gradienten in [mGal/m] (positiv nach oben) und für die Differenzen in [μ Gal/m] angegeben.

Tabelle 11-2: Vergleich von gemessenen und interpolierten Gradienten auf relativen Schwerestationen (mGal/m, Differenzen in $\mu\text{Gal/m}$)

Station	LSN-Nr.	VGG gem.	VGG int.	Diff.
Versoix	1001	0.2976	0.3297	-32.1
Maloja	1018	0.3645	0.3882	-23.7
Aarburg	1019	0.2635	0.2621	1.4
Bossy	2001	0.3066	0.2962	10.4
Moudon	2010	0.3330	0.3303	2.7
Fahy	2014	0.3145	0.3093	5.2
Chasseral	2016	0.4309	0.4508	-19.9
Riedholz	2031	0.2966	0.2919	4.7
Vogelberg	2034	0.5167	0.5178	-1.1
Lägern	2055	0.4616	0.4733	-11.7
Hönggerberg	2058	0.3401	0.3474	-7.3
Altdorf	2063	0.2649	0.2637	1.2
Glarus	2078	0.2632	0.2721	-8.9
Bonaduz	2086	0.2659	0.2803	-14.4
St. Margrethen	2098.1	0.2742	0.2783	-4.1
Ofenpass	2101	0.3378	0.3332	4.6
Wassen	3043	0.2769	0.2647	12.2
Sphinx (Jungfrauoch)	0013.7	0.4570	0.4933	-36.3

Die Differenzen zwischen gemessenen und interpolierten Gradienten sind meistens kleiner als $20 \mu\text{Gal/m}$. Dies ist zwar kein perfektes Resultat, für die Reduktion von Relativmessungen mit Instrumentenhöhen von deutlich unter einem Meter genügen sie aber durchaus. Besser wäre es natürlich, auf allen LSN-Punkten gemessene VGG zu haben, dies würde aber einen ziemlich grossen Messaufwand bedeuten.

Wenn man die Werte aus Tabelle 11-2 mit denjenigen aus [Condamin und Marti, 2017] vergleicht, so erkennt man, dass die Differenzen in der Neuberechnung auf vielen Punkten deutlich kleiner geworden sind. Dies betrifft vor allem Punkte mit stark variierender Nahtopografie (Vogelberg, Maloja, Wassen, Ofenpass, Chasseral). Dort zeigt sich ein deutlicher Vorteil bei der Verwendung von SwissAlti3D statt DHM25 für die Interpolation. Auch im benachbarten Ausland, wo der VGG im GPC der ETH Zürich 2017 [Cotugno und Duwell, 2017] auch auf einigen französischen Punkten gemessen wurde, zeigte sich gegenüber der früheren Interpolation eine deutliche Genauigkeitssteigerung. Diese ist dort der Verwendung von SwissAltiRegio statt EURODEM zu verdanken.

Die für das LSN verwendeten VGG sind in Anhang A3 aufgelistet.

12 Gesamtausgleichung des LSN

12.1 Einleitung

Die Gesamtausgleichung des LSN erfolgt mit der Software GRAVNET von swisstopo. Dieses Programm verarbeitet Absolut- und Relativmessungen gemeinsam. Zur Datenaufbereitung werden zusätzlich noch einige Hilfsprogramme benötigt. Dazu gehören PRESSCALE (Korrektur der Ablesungen eines LCR-Gravimeters um die Skalenfaktoren der Eich Tabellen), SCITOGRAV (Vorverarbeitung der Scintrex-Messungen), ETGTAB (Anbringen von verbesserten Gezeitenkorrekturen) und GRADIENT (Auswertung der Messungen von Vertikalgradienten). Alle Programme sind in FORTRAN95 geschrieben und unter Linux und Windows lauffähig.

12.2 Mathematisches Modell

Die Ausgleichung des LSN geschieht in GRAVNET vermittelnd nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Ausgleichung wird auf Bodenhöhe durchgeführt. Deshalb treten als primäre Unbekannte die ausgeglichenen Schwerewerte g_0 am Gravimeterstandort auf. Die Schwerewerte auf den Fixpunkten werden erst nachträglich mit dem Vertikalgradienten und der Höhe des Punktes unter/über Boden berechnet.

Neben den Schwerewerten auf den Punkten treten bei Relativmessungen auch weniger interessierende Unbekannte wie Driftparameter und Skalenfaktoren auf. Im mathematischen Modell sind bisher keine weiteren Unbekannten – wie zum Beispiel zeitliche Schwereänderungen – vorgesehen.

12.2.1 Absolutmessungen

Für die Absolutmessungen werden die vom METAS in den Messberichten ausgewiesenen Resultate auf der Referenzhöhe h (normalerweise für das FG5 130 cm) als Beobachtungen eingeführt. Es sind dies also der Schwerewert g_h und dessen Standardabweichung $\sigma_{g(h)}$ (einfache Messunsicherheit). Als Unbekannte tritt aber der auf den Boden (Festpunkt) reduzierte Schwerewert g_0 auf. Also

$$g_0 = g_h + \gamma \cdot h$$

mit γ =Vertikalgradient (positiv nach oben) und h =Instrumentenhöhe. Aus der Fehlerfortpflanzung ergibt sich für die Standardabweichung des auf den Boden reduzierten Schwerewertes:

$$\sigma_{g_0} = \sqrt{\sigma_{g_h}^2 + (h \cdot \sigma_\gamma)^2 + (\gamma \cdot \sigma_h)^2}$$

wobei σ_γ der Standardabweichung des Vertikalgradienten und σ_h der Standardabweichung der Instrumentenhöhe entspricht. Das ergibt die Beobachtungsgleichung

$$g_h + v = \bar{g}_0 - \gamma \cdot h$$

mit der unbekanntem ausgeglichenen Schwere \bar{g}_0 auf dem Boden und der Verbesserung v der Absolutmessung. Für das Diagonalelement der Kovarianzmatrix wird $\sigma_{\bar{g}_0}^2$ eingesetzt, wobei für die konkrete Realisierung für das LSN die Instrumentenhöhe als fehlerfrei angenommen wird.

12.2.2 Relativmessungen

Für die Relativmessungen gelten die Gravimeterablesungen als Beobachtungen. Allerdings müssen diese vorgängig zur Ausgleichung bereits um den Gezeiteneinfluss und eventuell weitere Einflüsse (z.B. Tilt, Luftdruck) korrigiert sein. Auch müssen die Gravimeterablesungen um die bekannten Skalenfaktoren aus den Eichkurven korrigiert werden. Dies ist insbesondere bei Instrumenten mit über den Messbereichen nicht-konstanten Massstäben wichtig – also klassischerweise bei Messungen mit LCR G-Gravimetern.

Die grundsätzliche Beobachtungsgleichung für die Relativmessungen ist die folgende:

$$r + v = \bar{g} + C + dt \cdot d$$

mit r der gezeitenkorrigierte Gravimeterablesung; \bar{g} dem ausgeglichenen Schwerewert; C dem konstanten Offset der Ableseung zum Startzeitpunkt t_0 der Session; dt der Zeitdifferenz der Ableseung seit t_0 ; d der linearen Drift des Instruments.

Die Driftparameter C und d gelten für eine Session, welche defaultmässig in der Auswertesoftware des LSN der Dauer eines Messtages entspricht. Falls der lineare Ansatz für die Drift keine befriedigenden Resultate liefert, so muss die Session aufgeteilt werden. Als Startzeitpunkt t_0 wird der Zeitpunkt der ersten Gravimeterablesung der Session (in Stunden) gewählt.

Da aber die ganze Ausgleichung auf dem Boden ($h=0$) ausgeführt wird, die Gravimeterablesung sich aber auf die Position des Sensors im Gravimeter bezieht, muss noch die Instrumentenhöhe berücksichtigt und die Beobachtungsgleichungen leicht modifiziert werden. Sie lauten nun:

$$r + v = \bar{g}_0 - \gamma \cdot (h - s) + C + dt \cdot d$$

Dabei sind γ der Vertikalgradient (positiv nach oben), h die gemessene Instrumentenhöhe ab Boden und s die vertikale Position des Sensors innerhalb des Gravimeters. s ist abhängig vom verwendeten Gerätetyp und kann negativ oder positiv sein, je nachdem, wo die Instrumentenhöhe gemessen wurde (siehe Kapitel 10.5). Die Einführung dieser Korrektur wegen der Instrumentenhöhe bewirkt keinerlei Schwierigkeiten für die Ausgleichung, da die Grössen γ , h und s als bekannt vorausgesetzt werden.

Die Beobachtungsgleichungen, so wie oben beschrieben, sind linear und können ohne Iterationen gelöst werden. Dies ändert sich allerdings, sobald wir einen unbekanntem Skalenfaktor m für die Gravimeterablesungen einführen. Dies ist üblicherweise nötig, da den publizierten Eich Tabellen oder Kalibrationswerten nicht ohne Weiteres vertraut werden darf. Das führt zu einer weiteren, leichten Modifikation der Beobachtungsgleichungen, welche nun nicht mehr linear sind (aus Gründen der Einfachheit wurde statt dem Skalenfaktor m sein Reziprokwert k als Unbekannte eingeführt):

$$r + v = [\bar{g}_0 - \gamma \cdot (h - s) + C + dt \cdot d] \cdot k$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass der Skalenfaktor ungefähr =1 ist und der Unterschied zwischen v und v/k vernachlässigt werden darf. Mehr als zwei bis drei Iterationsschritte sind auch mit dieser Modifikation nicht nötig.

Als Zeitdauer, für welche ein Skalenfaktor für ein bestimmtes Instrument gültig ist, wird in der Auswertesoftware als Default ein Kalenderjahr gewählt. Deshalb sollte der Skalenfaktor eines Instruments, wenn immer möglich nur vor der ersten Messkampagne des Jahres verändert werden.

Als Standardabweichung einer Relativmessung wird im stochastischen Modell der in den Rohdaten der Scintrex-Gravimeter ausgewiesene Wert verwendet oder es werden gerätetypische Standardwerte (Herstellerangaben) verwendet.

12.3 Datenaufbereitung

Bevor die Gesamtausgleichung erfolgen kann, müssen noch einige vorbereitende Arbeiten durchgeführt werden. Insbesondere müssen die Rohdaten noch um einige fehlende Informationen ergänzt und die Gezeitenkorrekturen neu gerechnet werden. Dazu sind einige manuelle Eingriffe mit einem Texteditor nötig und ein paar Hilfsprogramme müssen durchlaufen werden.

12.3.1 Die Rohdaten

Die Rohdaten der LCR-Messungen werden normalerweise auf Feldblättern erfasst. Dies umfasst eine Punktnummer, den genauen Messzeitpunkt, die Instrumentenhöhe und natürlich die Gravimeterablesung. Diese Daten werden mit einem Texteditor erfasst und danach mit einem kleinen Programm PRESSCALE um die Werte der Skalen-Eichtabelle korrigiert. Die Gezeitenkorrekturen werden erst nachträglich gerechnet.

Die Rohdaten des CG-5 werden auf dem Instrument in einem internen binären Format in einem einzigen File gespeichert. Dieses kann über eine serielle Schnittstelle auf einen Computer übertragen werden. Die Datenübertragung ist auch über eine USB-Schnittstelle und dem Programm SCTUTIL von Scintrex möglich. Neuere CG-5 verfügen auch über die Möglichkeit der Übertragung mit Bluetooth (das Exemplar von ETHZ/swisstopo jedoch noch nicht).

SCTUTIL dient auch dazu, die Originaldaten (.RAW) in ein lesbares Format zu bringen. Das .SGD-File (Scintrex Geophysical Data) ist ebenfalls ein binäres Format, welches mit verschiedenen Programmen direkt gelesen werden kann, nicht aber von der Software, wie sie bei swisstopo verwendet wird. Bei swisstopo können nur die Textdateien (.TXT und .ZYG) verarbeitet werden, wobei das .TXT vorzuziehen

ist, da es auch Informationen zu den verwendeten Einstellungen und Kalibrationswerten enthält. Diese Datei enthält die folgenden Spalten: Liniennummer, Stationsnummer (nur numerisch möglich), Instrumentenhöhe (wird üblicherweise im Feld nicht erfasst), korrigierter Schwerewert, Standardabweichung der Schwere (für Ein-Sekunden-Messungen), Neigungen in X- und Y-Richtung, Sensortemperatur, Gezeitenkorrektur, Messdauer in Sekunden, Anzahl Ausreisser, Zeit, Datum und Zeit, Terrainkorrektur (wird im Feld nicht erfasst) und Datum.

Neben diesen Files gibt es noch das .SMP-File (raw sample values), welches die originalen 6Hz-Sensordaten in einem Textformat enthält. Dieses wird aber nur erzeugt, falls man die Option zur Registrierung der Rohdaten aktiviert hat.

Beim CG-6 werden alle Daten schon auf dem Instrument in einem Textformat (.DAT) gespeichert. Interessanterweise ist das Format auf dem Tablet-PC leicht anders. Auf dem CG-6 sind gegenüber dem CG-5 noch einige Angaben mehr abgespeichert. Dies sind in erster Linie die angebrachten Korrekturen und die registrierten Positionen des GPS-Empfängers. Mehr Informationen zu den Fileformaten des CG-6 sind in [Marti und Condamin, 2021] gegeben.

12.3.2 SCITOGRAV

Die Rohdaten der Scintrex CG-5 und CG-6 werden mit dem Hilfsprogramm SCITOGRAV (Scintrex to GRAVNET) zunächst in ein geräteunabhängiges Standardformat gebracht. Dieses Format entspricht grundsätzlich demjenigen, wie es für das europäische Schwerenetz UEGN verwendet wurde. Sehr viele Informationen aus den Rohdaten (z.B. Tilts, angebrachte Korrekturen) sind dann in diesem Format nicht mehr ersichtlich. Es enthält nur noch die folgenden Spalten:

- Punktnummer
- Datum
- Uhrzeit
- Verwendeter Instrumententyp
- Seriennummer des Instruments
- Gravimeterablesung
- Schwerewert
- Standardabweichung der Schwere
- Instrumentenhöhe
- Angebrachte Gezeitenkorrektur
- Kommentare

Als Punktnummer steht die intern im Gravimeter verwendete Nummer. Diese muss in der Regel noch manuell durch die LSN-Nummer ersetzt werden, oder es muss eine Übersetzungstabelle (interne Nummer nach LSN-Nummer) verwendet werden.

Die Uhrzeit sollte immer in UT (Universal Time) registriert werden. Wurde dies im Gravimeter anders gesetzt, so wird die Zeit in SCITOGRAV korrigiert.

Die Gravimeterablesung und der zu verwendende Schwerewert müssen nicht unbedingt identisch sein. Die Gravimeterablesung enthält die ursprünglich im Instrument registrierte Messung. Insbesondere bei LCR-Messungen weicht diese vom Schwerewert in mGal ab. Aber auch bei Scintrex-Messungen muss dieser Wert nicht unbedingt mit dem zu verwendenden Schwerewert übereinstimmen, falls nachträglich noch verbesserte Korrekturen angebracht wurden (insbesondere Gezeiten, aber auch Tilt).

Die Standardabweichung wird bei Scintrex-Messungen so eingeführt, wie er im Gravimeter registriert wurde. Beim CG-5 wird die Standardabweichung für Ein-Sekunden-Messungen registriert. In SCITOGRAV wird dieser Wert noch durch die Wurzel der Messdauer des Cycles dividiert, um die Standardabweichung des gesamten Messzyklus zu erhalten.

Die Instrumentenhöhe (in cm) muss in der Regel auch noch manuell eingegeben werden, da sie im Feld nur auf Feldblättern notiert und nicht im Instrument eingetippt wird. Dies geschieht mit einem Texteditor oder mit einer Hilfstabelle. Die hier verwendete Instrumentenhöhe bezieht sich auf den Gravimeterstandort. Falls der Referenzbolzen nicht bodeneben ist, so wird diese Information nicht im Messfile der Relativmessungen, sondern bei den Stationsinformationen gespeichert.

Die Spalte «Gezeitenkorrektur» enthält die Korrektur, wie sie zur Berechnung des zu verwendenden Schwerewertes angebracht wurde.

In den Kommentaren wird üblicherweise die intern im Gravimeter verwendete Punktnummer und ein Stationsname (Ort) eingetragen.

Die in den Rohdaten fehlenden Informationen (insbesondere Punktnummer und Instrumentenhöhe) können in SCITOGRAV direkt aus einer Hilfstabelle gelesen werden, oder sie können nachträglich mit einem Texteditor nacherfasst werden.

12.3.3 ETGTAB

Beim CG-5 hat sich gezeigt, dass die Gezeitenkorrektur, welche direkt auf dem Instrument durchgeführt wird (Longman-Formeln, 1959), nicht perfekt ist. Gegenüber einem besseren Gezeitenmodell treten Unterschiede von bis ca. 5 μGal auf. Auch beim CG-6 – zumindest bei den auf dem Instrument gespeicherten Daten – treten Unterschiede in derselben Grössenordnung auf. Am deutlichsten sichtbar ist dies bei Permanentmessungen, wo beim Verwenden der original registrierten Gezeitenkorrekturen noch residuelle Gezeitensignale sichtbar sind (Abbildung 12-1). Diese sind verursacht durch ungenügende Gezeitenmodelle und durch Ocean Loading.

Um diese Unschönheit zu beseitigen, werden die Gezeitenkorrekturen vor der Ausgleichung neu gerechnet. Dazu dient das Programm ETGTAB (oder ETERNA), welches ursprünglich von H.-G. Wenzel (1996) stammt. Dieses Programm diente ursprünglich dazu, für einen bestimmten Ort Tabellen mit Gezeitenkorrekturen zu generieren. Dabei ist die Berechnung von Korrekturen aufs Potential, auf die Schwere, die Lotabweichung und die Geometrie möglich. Verwendet werden können verschiedene publizierte Modelle oder auch eigene Modelle aus Permanentmessungen eines Erdgezeitengravimeters. Standardmässig wird das Modell von Tamura (1987) mit 1200 Wellen verwendet.

Für die Bedürfnisse des LSN wurde ETGTAB so angepasst, dass auch direkt Beobachtungsfiles eines Relativgravimeters korrigiert werden können. Neben dem zu korrigierenden Messfile muss auch ein Stationsfile vorliegen, welches die zu verwendenden Koordinaten enthält.

Der Einfluss dieser Korrektur ist in Abbildung 12-1 zu sehen, wo die unkorrigierten, die mit den instrumenteninternen Modellen korrigierte Schweren und die mit ETGTAB korrigierten Schweren einer Permanentmessung dargestellt sind.

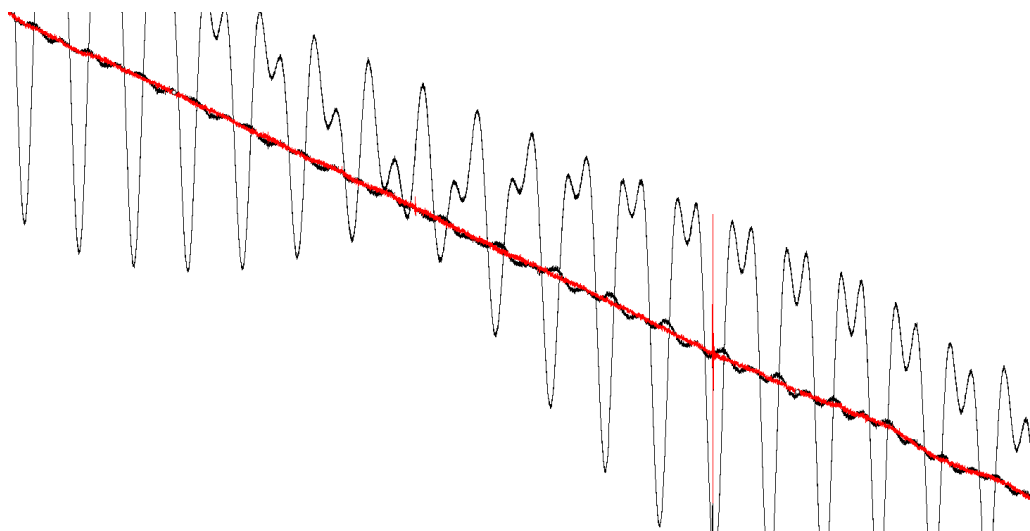


Abbildung 12-1: Unkorrigierte Schweren, mit den originalen Modellen korrigierte Schweren und mit ETGTAB korrigierte Schweren (in Rot) einer Permanentmessung

Falls mit ETGTAB Gezeitenkorrekturen gerechnet werden, welche mehr als 4–5 μGal von den ursprünglichen abweichen, so deutet dies in der Regel auf eine falsche Zeitregistrierung (Zeitzone!) oder eine falsche Punktnummer hin.

12.3.4 Elimination von Messungen

Schlechte Messungen werden aus den Beobachtungsfiles eliminiert. Dies sind meistens Daten, welche besonders stark durch Erschütterungen beeinträchtigt waren und deshalb einen grossen RMS und viele Ausreisser aufweisen, sowie abgebrochene Zyklen mit einer Messdauer von nur wenigen Sekunden.

Ebenfalls eliminiert werden alle von Hysteresis betroffenen Messungen. Nur die etwa vier letzten guten Messungen einer Station werden in der Ausgleichung weiterverwendet. Obwohl ein von Condamin (2016) entwickeltes Tool eine automatische Elimination schlechter Messungen erlaubt, wird für das LSN diese Arbeit immer noch manuell in einem Texteditor durchgeführt.

12.3.5 Manuelle Veränderungen von Messungen

Eigentlich sollte an den registrierten Messungen nichts manuell verändert werden. Es gibt aber bisher eine einzige Ausnahme davon im LSN. Es handelt sich dabei um den Punkt 2. Ordnung Zervreilasee. Dieser LV95-Punkt liegt nur etwa 150 Meter vom Stausee entfernt und der Wasserstand hat einen deutlichen Einfluss auf die Schwere. Deshalb ist der Punkt eigentlich nicht wirklich als Referenzpunkt für Schwere-messungen geeignet. Falls man ihn trotzdem verwenden will, so muss der Schwerewert um den Einfluss der Wassermassen korrigiert werden. Die entsprechenden, zur Messzeit vorhandenen Stauhöhen sind bei der Kraftwerke Zervreila AG zu erfahren. Im Juni 2015 stellte das Kraftwerk zudem ein bathymetrisches Modell des Sees mit einer Auflösung von 50 cm zur Verfügung. Dieses Modell wurde 2013 von der Firma Hydro Exploitation erstellt. Um die Kompatibilität mit den übrigen bathymetrischen Modellen der Schweiz herzustellen, wurde das Original zunächst auf eine Maschenweite von 2 Metern ausgedünnt. Danach wurde die Schwerewirkung des Sees auf die LSN-Station für verschiedene Wasserstände gerechnet. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung 12-2 dargestellt.

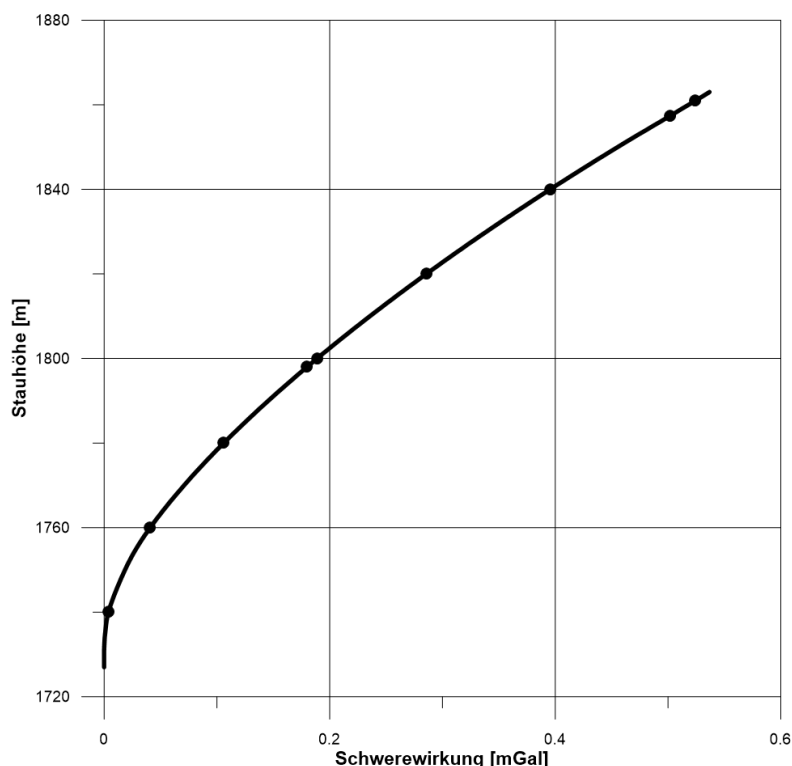


Abbildung 12-2: Schwerewirkung der Wassermassen des Zervreilasees für verschiedene Stauhöhen auf dem LSN-Punkt

Bei vollem See (Staukote ca. 1861 m) beträgt die Anziehungskraft der Wassermassen mehr als 0.5 mGal. Pro 1 Meter Seespiegeländerung ergibt sich bei vollem See eine Schwereänderung von ca. 6 μ Gal. Im Dorf Vals, etwa 5.5 km vom See entfernt, beträgt der Schwereunterschied zwischen vollem und leerem See nur noch etwa 1 μ Gal. Dort könnte also eine gute Schwerereferenzstation eingerichtet werden.

Um das Ergebnis zu verifizieren, wurden die Messungen vom Oktober 1992 (parallel mit 3 LCR, Staukote 1861 m) mit den Messungen vom Juni 2015 (parallel mit 2 CG-5, Staukote 1798 m) verglichen. 2015 wurde ein um 0.322 mGal tieferer Wert gemessen als 1992. Die Differenz der aus dem Modell gerechneten Schwerewirkungen für die beiden Staukoten beträgt 0.342 mGal, was recht gut zu den Messungen passt.

Für die Gesamtausgleichung des LSN wird die Schweremessung der Station Zervreilasee auf eine Stauhöhe von 1857.4 Meter (Seespiegel in SwissAlti3D) normiert und die Messungen manuell angepasst.

Eine weitere Station, auf welcher der variable Wasserstand eventuell einen Einfluss haben könnte, ist die Absolutstation in Basel. Bei extrem hohem Wasserstand des Rheins, wie er während der Absolutmessung 2006 vorhanden war, ist die Schwere um etwa 3 μ Gal höher als bei Normalwasser (siehe [Marti und Richard, 2007]). Dies ist aber nur eine sehr grobe Abschätzung, da in der Schweiz kein bathymetrisches Modell der Flüsse verfügbar ist.

12.4 Input-Files von GRAVNET

Als Input für die Ausgleichung mit GRAVNET werden einige Input-Files benötigt, welche im Folgenden kurz beschrieben sind. Alle diese Files sind bisher kolonnenbasiert. Das heisst, dass die Informationen aus exakt definierten Spalten gelesen werden.

12.4.1 File der Absolutmessungen

Alle für die Ausgleichung zu verwendenden Absolutmessungen werden in einem einzigen File gespeichert. Die wichtigsten enthaltenen Informationen sind:

- Stationsnummer (LSN.Nummer)
- Messdatum im Format YYYYMMDD
- Schwerewert in mGal
- Standardabweichung in mGal
- Instrumentenhöhe in cm

Der enthaltene Schwerewert muss bereits um alle bekannten Einflüsse (insbesondere Gezeiten) korrigiert sein. Die Standardabweichung bezieht sich auf die Schwere auf Instrumentenhöhe und beträgt meistens die Hälfte der in den Messberichten des METAS ausgewiesenen erweiterten Messunsicherheit.

Weiter im File der Absolutmessungen enthaltene Informationen, welche aber nur zur Information dienen, sind das verwendete Instrument, die Organisation, welche die Messung durchgeführt hat und eine nähere Ortsbezeichnung.

Als wichtige Information einer Absolutmessung ist also der Vertikalgradient und dessen Standardabweichung nicht in diesem File enthalten. Diese Werte stehen im File der Stationen. Dies hat den Nachteil, dass alle Absolutmessungen einer Station mit demselben Gradienten in die Ausgleichung einfließen müssen. Bisher gab es aber noch keinen Anlass, dies zu ändern.

Das File der Absolutmessungen kann auch dazu verwendet werden, um eine reine Ausgleichung von Relativmessungen durchzuführen (frei oder gezwängt). Dazu muss mindestens eine Pseudo-Absolutbeobachtung mit dem zu verwendenden Anschlusswert eingeführt werden.

12.4.2 File der Relativmessungen

Die eigentlichen Input-Files der Relativmessungen sind die in der Vorverarbeitung mit SCITOGRAV aus den Rohdaten erzeugten Dateien. Die tatsächlich in der Ausgleichung zu verwendenden Files sind in einer weiteren Datei aufgelistet, welche noch einige Zusatzinformationen enthält. Neben dem verwendeten Gravimetertyp und der Instrumentennummer ist dies ein Code für die Behandlung der Unbekannten. Dieser kann die folgenden Werte annehmen:

- 0: Dies ist ein normales Messfile, bei welchem eine Drift und (falls verlangt) ein Massstab geschätzt wird.
- 1: Es wird keine Drift geschätzt, sondern nur ein Offset und ein Massstab. Dies wird verwendet für Datensätze, von welchen keine Originaldaten vorliegen, sondern nur bereits ausgeglichene Resultate.

- 2: Es wird nur eine Drift, aber kein Massstab geschätzt. Dies wird verwendet für Relativmessungen mit einem im LSN selten verwendeten Instrument, aus welchen sich kein Skalenfaktor schätzen lässt.
- 3: Keine Schätzung von Drift oder Massstab. Dies ist ähnlich wie bei Code 1 vorgesehen für Daten, von welchen nur die Resultate vorliegen.

12.4.3 File der Stationen

Das File mit den Stationen enthält die Informationen zu den Punkten des LSN. Folgende Werte werden in der Gesamtausgleichung auch tatsächlich verwendet:

- LSN-Nummer
- Name der Station
- Höhe des Punktes unter/über Boden, getrennt nach Punkten im Schacht und HFP
- Näherungsschwere (ist nicht sehr wichtig, verbessert aber die Konvergenz bei der Iteration)
- Gemessener und aus Massen interpolierter Gradient
- Standardabweichung des gemessenen Gradienten

Die enthaltenen Längen und Breiten in ETRS89 und die Höhe (in LN02) werden im Programm ETGTAB zur Berechnung der Gezeitenkorrekturen verwendet.

Die übrigen in der Datei enthaltenen Spalten werden in GRAVNET nicht verwendet. Sie geben einige Zusatzinformationen zur Punktidentität mit HFP und LFP und die Lagekoordinaten in LV95.

Teilweise als problematisch hat sich erwiesen, dass die Höhe des Punktes unter/über Boden im Stationsfile abgespeichert ist und nicht bei den Messungen, da es vorkommen kann, dass diese Information mit der Zeit ändert. Beispiele dafür sind das Setzen eines neuen Schachtes in Bonaduz oder die komplette Neugestaltung der Umgebung des Punktes in Gampel. In solchen Fällen müssen die gemessenen Instrumentenhöhen in den Messfiles nachträglich angepasst werden. Dies ist sehr aufwändig und unschön, wurde aber bisher nicht in der Software verbessert.

12.4.4 File der Instrumente

Das File mit den Informationen zu den Relativgravimetern, welche im LSN verwendet wurden, enthält folgende Einträge:

- Gravimetertyp
- Seriennummer
- Nominelle Standardabweichung einer Messung
- Sensorposition (in cm)

Die übrigen Einträge sind nur Kommentar. Dies sind der volle Name des Instruments und die Betreiberorganisation. Folgende Instrumententypen sind bisher für das LSN definiert:

- 0: Pseudo-Instrument für die Integration von Resultatfiles in die Ausgleichung
- 1: Lacoste&Romberg (LCR) Typ G
- 2: LCR Typ G mit Feedback System
- 3: Scintrex CG-3
- 4: Scintrex CG-3M
- 5: LCR Typ G mit Feedback System ALIOD
- 6: LCR Typ D
- 7: ZLS Burris
- 10: Scintrex CG-5
- 11: Scintrex CG-6

Die nominelle Standardabweichung ist meist den Herstellerangaben entnommen. Sie wird verwendet, falls in den Messfiles keine individuelle Standardabweichung einer Messung enthalten ist.

Die Sensorposition ist die vertikale Position des Sensors relativ zur gemessenen Instrumentenhöhe. Dies kann sich auf die Unterkante oder die Oberkante des Instruments beziehen. Für ein bestimmtes Instrument muss die Instrumentenhöhe immer identisch gemessen werden. Falls dies nicht der Fall ist, so muss die Instrumentenhöhe im Messfile angepasst werden.

12.4.5 File der Skalenfaktoren

Das File der Skalenfaktoren ist optional. Es enthält die Informationen über die vorgegebenen oder zu bestimmenden Massstäbe. Es enthält in seiner vollständigen Form folgende Spalten:

- Eine durchlaufende Nummerierung
- Instrumententyp und Seriennummer
- Start- und End-Datum des für einen Massstab gültigen Zeitraums
- Skalenfaktor (genauer: der reziproke Skalenfaktor, wie er in der Ausgleichung bestimmt wird)
- Reziproke Massstabskorrektur in ppm (informativ)
- Standardabweichung des Skalenfaktors in ppm

Falls dieses File fehlt oder ein bestimmter Zeitraum für ein Instrument darin nicht enthalten ist, so wird ein Skalenfaktor pro Kalenderjahr definiert.

Falls in der Ausgleichung das Schätzen von Massstäben verlangt wird, so werden nur die definierten Zeiträume aus dem File verwendet.

Falls mit vorgegebenen Massstäben gerechnet wird, so werden auch die Skalenfaktoren und deren Standardabweichungen gelesen. Falls das File fehlt, so wird immer ein Massstab von 1 verwendet.

12.5 Optionen von GRAVNET

GRAVNET benötigt neben der Definition der 5 Input-Files und der 2 Output-Files nur noch sehr wenige weitere Optionen für die Ausgleichung. Diese betreffen die Behandlung der Vertikalgradienten, das Schätzen von Skalenfaktoren und die Gewichtung zwischen Absolut- und Relativmessungen.

```

geo@l0t2111a:/data/geodata/schwerefeld/LSN2004/reduziert
GRAVNET GRAVNET
MEN 0 : H A U P T - M E N                               16/03/22  9:06
-----
--- INPUT / OUTPUT ---
<1> Filename Stationsdaten           : stations.txt          *
<2> Filename Instrumenteninformationen : instruments.txt       *
<3> Filename Absolutmessungen        : absolut.txt          *
<4> Filename Relativmessungen        : rellist.txt          *
<5> Art der Gradientenbehandlung     : 2                    *
<6> Massstaebe schaeetzten?          : NEIN                 *
<A> File der Skalenfaktoren          : scales_new.txt       *
<7> Daempfungsfaktor Relativmessungen : 5                    *
<8> Protokollfile                    : LSN2021m.prn        *
<9> Resultatfile                     : LSN2021m.res        *
-----
< X >   Programm starten
-----
Waehle : █
-----

```

Abbildung 12-3: Optionenbildschirm von GRAVNET unter Linux

12.5.1 Vertikalgradient

Welche Vertikalgradienten (VGG) in die Ausgleichung eingeführt werden, ist ziemlich wichtig für das ausgewiesene Resultat. Es sollten natürlich immer die besten vorhandenen Werte verwendet werden. Das sind die gemessenen Gradienten und, falls keine solchen vorhanden sind, die aus Massen berechneten Werte. Die übrigen Optionen für die Behandlung der VGG sind nur für Testzwecke gedacht und zeigen die Differenzen, welche durch eine Vernachlässigung von individuellen VGG entstehen können. Die in GRAVNET möglichen Varianten sind die folgenden:

- 0: überall den Standardgradienten von 0.3086 mGal/m verwenden,
- 1: nur die gemessenen Gradienten verwenden; sonst überall Standardgradient,
- 2: gemessene Gradienten und aus dem DHM interpolierte Gradienten verwenden,

Die besten Resultate werden mit der Option 2 erzielt. Option 0 ist insbesondere bei der Reduktion der Absolutmessungen auf den Boden unbrauchbar. Aber auch Option 1 führt bei den Relativstationen zu erhöhten Zwängen. Auch unterscheiden sich die auf den Fixpunkt reduzierten Schweren bei Punkten, welche nicht bodeneben sind, oft um mehr als 0.1 mGal.

12.5.2 Schätzen von Skalenfaktoren

In der Ausgleichung können Skalenfaktoren geschätzt werden, oder es können vordefinierte Werte als bekannt eingeführt werden. Defaultmässig wird ein Skalenfaktor pro Instrument und Kalenderjahr eingeführt, ausser dies ist im Skalenfile (siehe Kapitel 12.4.5) anders definiert.

Masstäbe müssen in der Gesamtausgleichung des LSN auf jeden Fall geschätzt oder als bekannt eingeführt werden. Falls dies nicht gemacht wird und überall ein Massstab von 1 eingeführt wird, so resultiert dies in relativ starken Zwängen des Netzes.

Für das Schätzen von Skalenfaktoren sind die Beobachtungsgleichungen nicht mehr linear und es muss eine Iteration durchgeführt werden. Drei Iterationsschritte genügen dafür aber problemlos.

Die meisten Ausgleichungen des LSN erfolgen mit Schätzung eines Skalenfaktors, ausser den ersten Berechnungen eines Kalenderjahres, wenn die Bestimmung eines Massstabs noch sehr unsicher ist. Auch die Schlusslösung eines Kalenderjahres wird mit fixierten Massstäben gerechnet. Dabei werden die letzten berechneten Werte als bekannt eingeführt. Dies ergibt zwar dieselben ausgeglichenen Schweren, die Statistik wird aber leicht besser. Dies ist eine Folge der hohen Korrelation zwischen den unbekanntem Skalenfaktoren und den Offsets der Drifts.

12.5.3 Dämpfungsfaktor der Relativmessungen

Die in den Rohdaten ausgewiesenen Standardabweichungen der Relativmessungen sind viel zu optimistisch. Sie zeigen nur eine Streuung der einzelnen Messungen eines Cycles und entsprechen nicht einer äusseren Genauigkeit. Falls diese nun so in die Gesamtausgleichung eingeführt würden, erhielten sie gegenüber den Absolutmessungen ein zu starkes Gewicht, und ein zu grosser Anteil der Verbesserungen würde den Absolutmessungen zugewiesen. Um dies zu verhindern, werden die Relativmessungen mit einem empirischen Faktor abgeschwächt. Ein Faktor von 5, mit welchem die originalen Standardabweichungen der Relativmessungen multipliziert werden, hat sich für die Ausgleichung des LSN als sinnvoll erwiesen.

12.6 Output von GRAVNET

GRAVNET liefert zwei Outputfiles. Das eine – das Resultatfile – enthält als neue Information nur die ausgeglichenen Schweren auf Höhe der Fixpunkte. Es hat die Struktur des Stationsfiles und kann somit in einer weiteren Berechnung als Input verwendet werden.

Das zweite Outputfile – das Protokollfile – enthält alle Informationen zur Ausgleichung. Es gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Gewählte Optionen,
- verwendete Input-Files,
- Anzahl Messungen und Anzahl Unbekannte der Ausgleichung,
- Anzahl Messungen pro Punkt,
- die ausgeglichenen Driftparameter,
- die ausgeglichenen oder vorgegebenen Skalenfaktoren,
- die ausgeglichenen Schweren am Boden und auf dem Fixpunkt inklusive Standardabweichung und Differenz der Schwere zum Input-Wert,
- die Verbesserungen der Absolutmessungen,
- die Verbesserungen der Relativmessungen.

12.7 Das Programm GRAVNIV

GRAVNIV ist neben GRAVNET ein zweites Ausgleichungsprogramm für Schweremessungen. Es wird zwar im LSN nicht verwendet, soll aber hier trotzdem kurz beschrieben werden.

GRAVNIV wurde entwickelt für die Ausgleichung der Schweremessungen für das Landeshöhennetz, wird aber auch für weitere Ausgleichungen von Schweremessungen in geodätischen oder geophysikalischen Projekten verwendet, bei welchen sehr viele neue und immer wieder wechselnde Punkte beobachtet werden. Die Genauigkeitsanforderungen sind gegenüber dem LSN meist leicht geringer und es werden einige Vereinfachungen gemacht.

```

X geo@i0t2111a:/data/geodata/schwerfeld/nivschwere/2021
GRAVNIV GRAVNIV
MEN 0 : H A U P T - M E N 16/03/22 14:45
-----
--- INPUT / OUTPUT ---
<1> Filename Schweredaten : LN2021_red.txt *
Export aus Excel im Format "TXT, Tabulatorgetrennt"
<2> Filename Headerinformationen : HEADER.TXT *
Einfaches Textfile erzeugt durch Copy/Paste aus
TXT-File des Gravimeters
<3> Protokollfile : LN2021_sc900.res *
<4> Gravimetertyp (CG-5, CG-6) : CG-6
<5> Mastabkorrektur des Gravimeters 1: 1.000900
-----
< X > Programm starten
-----
Waehle : █

```

Abbildung 12-4: Optionenbildschirm von GRAVNIV

GRAVNIV verwendet dasselbe mathematische Modell wie GRAVNET, erlaubt aber keine Einführung von Absolutmessungen. Nur eine Lagerung auf Punkten mit bekannter Schwere ist vorgesehen, und es muss mindestens einer der gemessenen Punkte als fixiert in die Ausgleichung eingeführt werden.

Als Input in GRAVNIV wird nur eine einzige Messdatei verwendet, deren Format mehr oder weniger den Rohdaten des CG-5 entspricht. Das exakte Format kann mit SCITOGRAV erzeugt werden. Das File muss aber noch um einige nötige Angaben erweitert werden. Es sind dies

- Ortsbezeichnung
- Punktnummer (Kanton, Ordnungsnummer) und Punktbezeichnung (Typ, Inschrift)
- Instrumentenhöhe und Abstich des Fixpunktes
- bestehender Schwerewert und letztes Messjahr
- Koordinaten und Höhe des Punktes (optional)
- aus QUAWIRK interpolierte Schwere (optional)
- Vertikalgradient (optional)

Als weitere Unterschiede zu GRAVNET sind zu nennen:

- Alle Beobachtungen müssen mit demselben Instrument durchgeführt werden;
- das Schätzen eines Skalenfaktors ist nicht möglich, jedoch kann ein bekannter Massstab berücksichtigt werden;
- normalerweise werden die Gezeiten nicht neu mit ETGTAB berechnet;
- die Einführung von individuellen Vertikalgradienten ist zwar möglich, normalerweise wird aber auf allen Punkten der Standardgradient verwendet.

Der Output von GRAVNIV ist gegenüber GRAVNET etwas erweitert. Er enthält:

- alle Angaben zu den verwendeten Einstellungen und Kalibrationswerten des Gravimeters;
- eine Koordinatenliste aller Punkte mit bereits bestehenden Schwerewerten;
- die Rohdaten der Messungen;
- die ausgeglichenen Driftparameter;
- die ausgeglichenen Schwerewerte;

- eine Vergleichstabelle der ausgeglichenen Schweren mit bereits bestehenden Werten und den aus dem DHM mit QUAWIRK interpolierten Schweren;
- die Verbesserungen.

Da die mit GRAVNIV ausgeglichenen Projekte meist nur eine sehr geringe Überbestimmung aufweisen, sind die ausgewiesenen Standardabweichungen meistens viel zu optimistisch. Um eine realistischere Abschätzung der Genauigkeit zu erhalten, sollten auch in solchen Projekten einige Punkte mehrfach beobachtet werden.

12.8 Zusammenfassung der Ausgleichungen

Eine Gesamtausgleichung des LSN wird seit 2012 nach jeder grösseren Kampagne durchgeführt. Die Berechnungen und Outputfiles enthalten im Namen das Jahr der letzten berücksichtigten Messungen ergänzt mit einem fortlaufenden Buchstaben (a, b, c, d, ...).

Eine erste grosse Verbesserung der Lösung war die Einführung der Schätzung eines Skalenfaktors und die Herabgewichtung der Relativmessungen gegenüber den Absolutmessungen.

Eine grosse Genauigkeitssteigerung erfolgte dann 2015, als begonnen wurde, die stark von Hysteresis betroffenen Messungen konsequent aus der Ausgleichung zu eliminieren und nur noch die vier letzten guten Messungen zu verwenden.

Grössere Änderungen in den Lösungen gibt es jeweils, wenn die Vertikalgradienten geändert werden. Sei dies durch Neumessungen oder durch das Ändern des Berechnungsmodells aus Massen, wie insbesondere 2020, als bei der Interpolation von DHM25 auf SwissAlti3D gewechselt wurde.

Einige Probleme bereitete zunächst die Integration der Messungen des CG-6 aus dem Jahr 2021. Das war eine Folge des stark veränderlichen Skalenfaktors dieses Instruments. Das Schätzen eines Massstabs pro Messkampagne und nicht nur pro Kalenderjahr verbesserte die Situation wesentlich.

Ebenfalls von grossem Nutzen war die Neuberechnung der Tilt-Korrektur mit verbesserten Kalibrationswerten für einen Grossteil der Messungen mit dem CG-6 des Jahres 2020.

Die Standardabweichungen auf den heute noch aktuellen Absolutstationen sind alle besser als 2 μGal . Eine Ausnahme ist nur der Punkt WAN A am METAS mit 2.7 μGal . Dies ist aber eine Folge davon, dass auf diesem Punkt nur der Mittelwert aller Absolutmessungen in der Gesamtausgleichung eingeführt wurde und da der Punkt üblicherweise mit dem FG5 besetzt ist, dort nur relativ wenige Relativmessungen durchgeführt werden konnten. Auf der Absolutstation Zimmerwald beträgt die Standardabweichung lediglich 0.6 μGal . Man muss sich aber bewusst sein, dass dies für den Mittelwert über alle Messungen gilt. Zu einem beliebigen Zeitpunkt kann der Schwerewert wegen möglichen saisonalen Schwankungen stärker variieren.

Auch auf den wichtigsten Exzentrumsunkten der Absolutstationen sind die Standardabweichungen alle kleiner als 3 μGal . Die Ausnahme ist hier das Exzentrum an der EPF Lausanne mit 3.4 μGal , welches relativ wenig gemessen wurde.

Die Punkte 1. Ordnung weisen Standardabweichungen zwischen 1.2 (Aarburg) und 3.5 μGal (Versoix) auf. Dies sind alles sehr gute Werte. Kleine Unterschiede sind vor allem durch die unterschiedliche Anzahl Messungen auf diesen Punkten begründet.

Heute weisen alle Punkte des LSN 2. Ordnung eine Standardabweichung von besser als 8 μGal auf. Nur der Punkt in Jeizinen liegt mit 8.2 μGal knapp darüber. Der Punkt auf dem Monte Generoso (ca. 12 μGal) wurde erst einmal beobachtet.

Im Netz 3. Ordnung gibt es noch etliche Punkte, welche eine relativ schlechte Genauigkeit aufweisen. Dies liegt einerseits daran, dass auf diesen Punkten noch relativ wenige Messungen ausgeführt wurden und andererseits daran, dass einige dieser Punkte nicht sehr stabil sind (Grundwasserschwankungen, Senkungen) oder dass die Messungen meistens durch Vibrationen gestört wurden.

Die Schwerewerte und Standardabweichungen mit Stand Ende 2021 (Lösung LSN2021m) sind in Anhang A3 für die heute noch aktuellen Punkte zusammengestellt. Die Gesamtausgleichung des LSN enthält noch einige Punkte mehr. Dies sind vor allem zerstörte Punkte und einige Punkte, welche nur als temporäre Hilfspunkte benutzt wurden.

Die aktuelle Gesamtausgleichung LSN2021m umfasst 178 Absolutmessungen und etwa 13'400 Relativmessungen. Als Unbekannte werden 532 Schweren, je 447 Drifts und Offsets, sowie 48 Skalenfaktoren bestimmt. Eine Berechnung unter Schätzen der Skalenfaktoren (drei Iterationen) dauert auf dem Linux-Rechner ca. eine Stunde.

13 Vergleich mit früheren Schwerenetzen

Bei der Messung des LSN ergaben sich etliche Verknüpfungspunkte mit den älteren Schwerenetzen der Schweiz. Mit dem SG95 ergab sich natürlicherweise eine starke Verbindung, da das LSN auf dessen Punkten aufbaut. Alle heute noch bestehenden Punkte des SG95 sind deshalb auch LSN-Punkte. Mit den älteren Netzen (SGN53, SKN68, EKN76, SNGN83) ist das LSN insbesondere über das Netz 3. Ordnung verknüpft. Die meisten der Punkte 3. Ordnung des LSN waren auch schon in älteren Grundnetzen enthalten.

Ein erstes Ziel der Verknüpfung mit den älteren Netzen ist das Aufdecken von systematischen Unterschieden und damit auch eine Abschätzung der Qualität der älteren Daten. Dies betrifft nicht nur die alten Grundnetze, sondern auch alle darauf basierenden Messungen, wie zum Beispiel jene für das Landeshöhennetz oder den gravimetrischen Atlas.

Ein zweites Ziel wäre das Aufdecken von langfristigen Schwereänderungen in der Schweiz. Davon sind wir aber noch ziemlich weit entfernt. Bis heute können noch nirgendwo in der Schweiz zuverlässig Schwereänderungen festgestellt werden. Offenbar sind diese zu klein verglichen mit der Ungenauigkeit der älteren Schweremessungen. Das Hauptproblem liegt dabei in der Genauigkeit der Anschlusspunkte und der älteren Absolutmessungen sowie bei Massstabsproblemen der Relativgravimeter.

In einem ersten Vergleich wurden die Resultate des LSN mit den Resultaten der publizierten älteren Schwerenetze verglichen. Dies sind das SGN53 (inkl. REUN und Testschleife), das EKN76, das SNGN83 und das SG95. Das SKN68 konnte nicht ohne grossen Aufwand verglichen werden, da nur Schweren für die Gravimeterstandorte publiziert wurden.

In der folgenden Tabelle 13-1 sind einige statistische Angaben zu den Vergleichen zwischen den alten Netzen und dem LSN festgehalten. Das Vorzeichen ist im Sinn von Schwere im LSN minus Schwere im alten Netz zu verstehen. Einige wenige grobe Ausreisser wurden aus den Daten eliminiert.

Tabelle 13-1: Statistik der Schweredifferenzen «LSN minus alte Schwere» (in mGal)

	SGN53	EKN76	SNGN83	SG95
Anzahl Punkte	104	11	72	138
Mittelwert	-0.087	-0.061	-0.019	-0.012
Standardabweichung	0.139	0.093	0.108	0.030
Minimum	-0.399	-0.206	-0.300	-0.119
Maximum	0.449	0.065	0.163	0.104

Der generelle Offset der Schweremessungen (Zeile «Mittelwert») zu den aktuellen Werten aus dem LSN wurde mit der Zeit immer kleiner. Spätestens seit der Verwendung der ersten Absolutmessungen im SNGN83 liegt der Offset in einem Bereich, welcher der Genauigkeit einer Relativmessung mit einem LCR-Gravimeter entspricht. Aber auch schon in den früheren Netzen ist der Offset nicht sehr gross. Auch die Standardabweichung der Differenzen wird mit der Zeit tendenziell immer kleiner. Dass diese im SNGN83 gegenüber dem EKN76 leicht ansteigt, hat verschiedene Gründe. Einerseits sind im EKN76 nur sehr wenige Punkte gemessen worden und keiner davon liegt in einer extremen Höhenlage. Dadurch wirken sich Massstabsfehler der Gravimeter nicht so stark aus. Andererseits waren die Absolutmessungen von 1978–1980 wohl deutlich weniger genau als damals angenommen. Dies verursacht zusätzliche Zwänge im SNGN83. Die Streuung der Differenzen zwischen dem LSN und dem SG95 sind dann mit 0.03 mGal recht klein. Extremwerte von mehr als 0.1 mGal treten aber trotzdem auf.

Die Differenzen zwischen dem LSN und SG95 sind in Abbildung 13-1 dargestellt. Hier sieht man, dass der Grossteil der Differenzen kleiner als ± 0.02 mGal ist. Eine leichte negative Tendenz ist in der Westschweiz sichtbar und eine kleine positive Systematik im Oberwallis. Die übrigen Differenzen scheinen ziemlich zufällig verteilt zu sein.

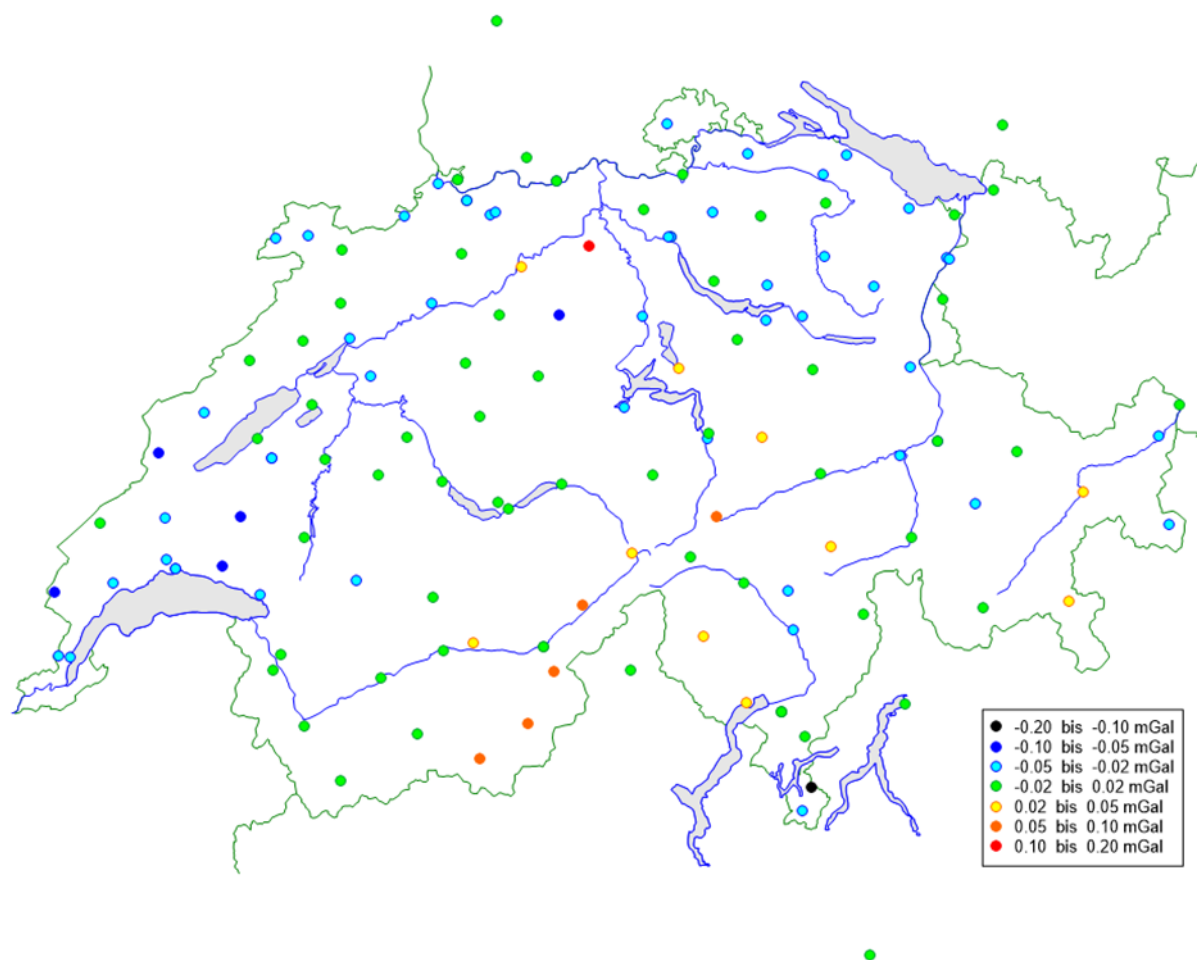


Abbildung 13-1: Differenzen des LSN minus SG95

Für die Vergleiche mit den übrigen Netzen wurden auch alle Daten, welche für das Landeshöhennetz gemessen wurden, miteinbezogen. Dies gibt noch etliche Punkte mehr, auf welchen ein Vergleich möglich ist.

Die älteren Daten wurden in zeitliche Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe umfasst die Messungen der 1950er Jahre. Dies waren die Messungen für das SGN53, aber auch für das REUN-Netz und die Testschleife, welche mit Worden-Gravimetern gemessen wurden.

Die zweite Gruppe umfasst die Periode von etwa 1968 bis 1989. Diese Daten enthalten in diesem Vergleich das EKN76 und das SNGN83 sowie die in diesem Zeitraum gemessenen Schweren für das LHN.

Die dritte Gruppe umfasst den Zeitraum zwischen 1989 und 2003. Die Schweremessungen für das LHN in dieser Epoche stützen sich vor allem auf SNGN83 oder auf die jeweils aktuellen Absolutmessungen in Zürich, später teilweise auch schon auf des SG95.

Die vierte Epoche sind die Messungen seit 2003. Diese stützen sich zunächst auf das SG95, später dann auch bereits auf die jeweils aktuellen Werte des LSN.

Die Statistik dieses Vergleichs ist in der folgenden Tabelle 13-2 aufgelistet. Wiederum wurden einige wenige sehr grobe Ausreisser eliminiert.

Tabelle 13-2: Statistik der Differenzen des LSN und aktuellen Schweremessungen für das LHN mit älteren Messungen (in mGal)

	1953-1967	1968-1989	1990-2003	2004-2021
Anzahl Punkte	272	314	269	124
Mittelwert	-0.095	0.008	-0.006	-0.001
Standardabweichung	0.159	0.116	0.107	0.041
Minimum	-0.517	-0.317	-0.492	-0.099
Maximum	0.449	0.371	0.501	0.187

Die Zahlen sind recht ähnlich zu den Werten in Tabelle 13-1. Ein signifikanter Offset ist nur in den ältesten Messungen der 1950er Jahre erkennbar, und die Standardabweichung der Differenzen nehmen mit der Zeit ab. Aber auch in den neuesten Messungen ab 2003 kommen vereinzelt noch sehr grosse Differenzen von mehr als 0.1 mGal vor, obwohl sich in dieser Zeit die Messungen für das LHN bereits grösstenteils auf das LSN abstützten. Der Hauptgrund liegt in der unterschiedlichen Behandlung des Vertikalgradienten: Während im LSN aus Massen interpolierte Gradienten verwendet werden, wird im LHN für die Reduktion auf den Fixpunkt normalerweise der Standardgradient benutzt. Dies verursacht insbesondere auf weit über dem Boden gesetzten Punkten teilweise recht grosse Unterschiede.

Um die geografische Verteilung der Differenzen zu zeigen, dienen die folgenden Abbildungen. Die Farbskala wurde in allen Abbildungen identisch gewählt, aber mit einem anderen Wertebereich als in Abbildung 13-1 (dort wären sonst praktisch alle Punkte grün).

Abbildung 13-2 zeigt den Vergleich des LSN und den darauf basierenden Schweremessungen für das LHN mit den in den 1950er Jahren gemessenen Schweren. Die extremsten Unterschiede betragen etwa ±0.5 mGal. Zudem zeigt sich eine ziemlich klare geografische Korrelation der Differenzen. In einigen Gegenden sind die alten Schweren systematisch 0.2 bis 0.3 mGal tiefer als die aktuellen Werte. Dies betrifft vor allem Regionen im Süden. Positive Differenzen kommen meistens im Norden (Bodensee, Aargau, Basel) vor.

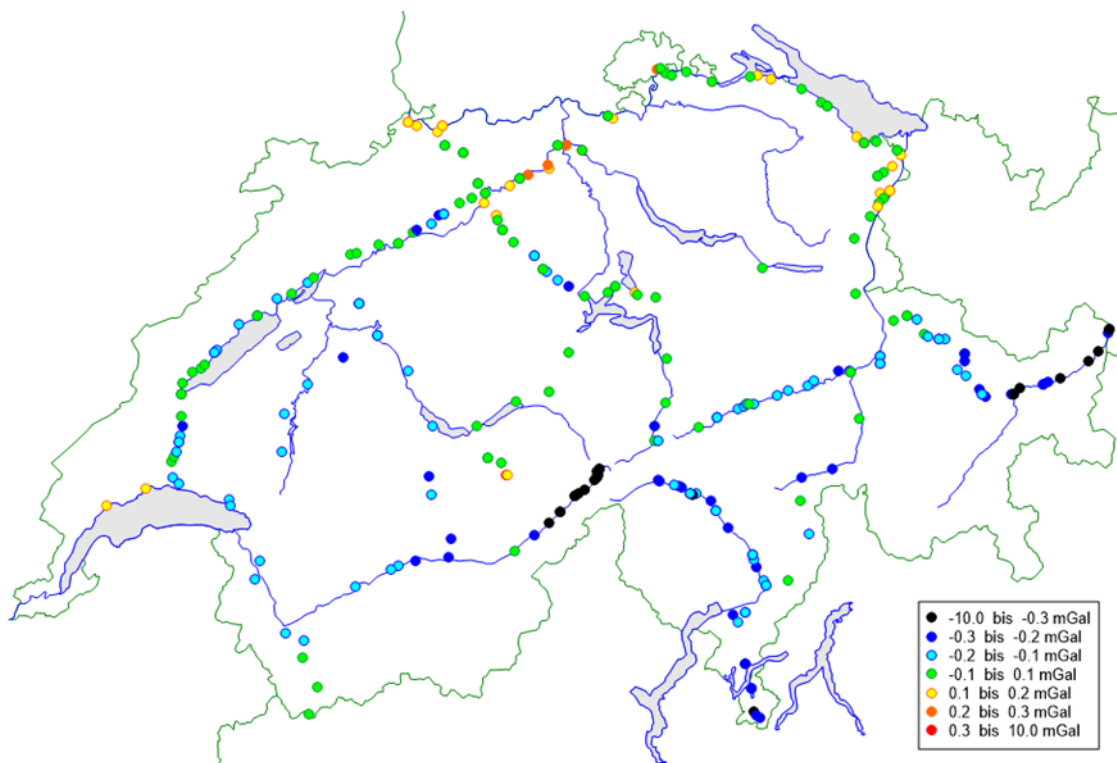


Abbildung 13-2: Vergleich des LSN mit den Schweremessungen 1953–1957

Abbildung 13-3 zeigt den Vergleich für die Periode von 1968 bis 1989. Hier gibt es praktisch keine Differenzen mehr, welche den Betrag von 0.3 mGal übersteigen. Aber auch hier sind leichte regionale Unterschiede erkennbar. Die meisten negativen Werte liegen im Süden (v.a. VS und GR) und die meisten positiven Unterschiede im Norden.

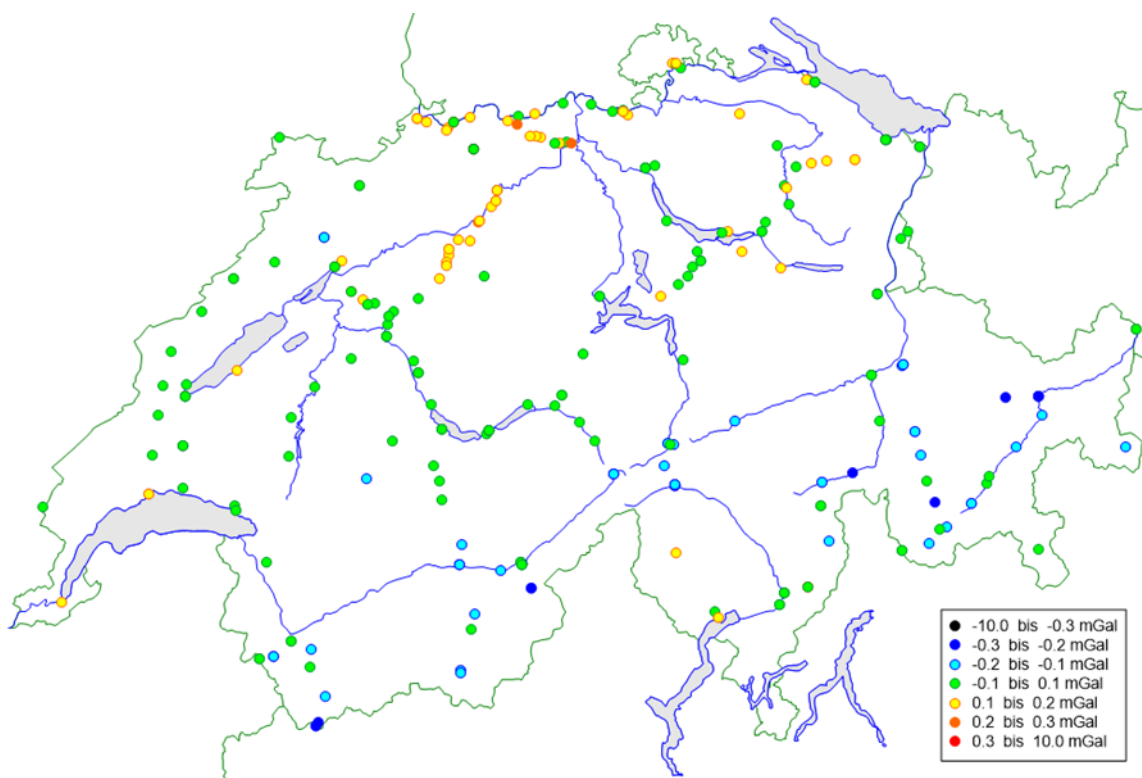


Abbildung 13-3: Vergleich des LSN mit den Schweremessungen 1968–1989

Der Vergleich der Daten 1990 bis 2003 ist in Abbildung 13-4 dargestellt. Eine regionale Korrelation ist in dieser Darstellung kaum mehr erkennbar. Allerdings treten vereinzelt Punkte mit grösseren Differenzen auf. Dies sind alle Punkte, welche für das LHN gemessen wurden. Der Grund liegt neben den schon erwähnten Problemen mit dem Vertikalgradienten darin, dass in dieser Zeit das Hauptgewicht nicht auf einer extrem genauen Bestimmung der Schwere auf den HFP geachtet wurde, sondern nur darauf, dass sie für die Reduktion des Nivellements brauchbar waren.

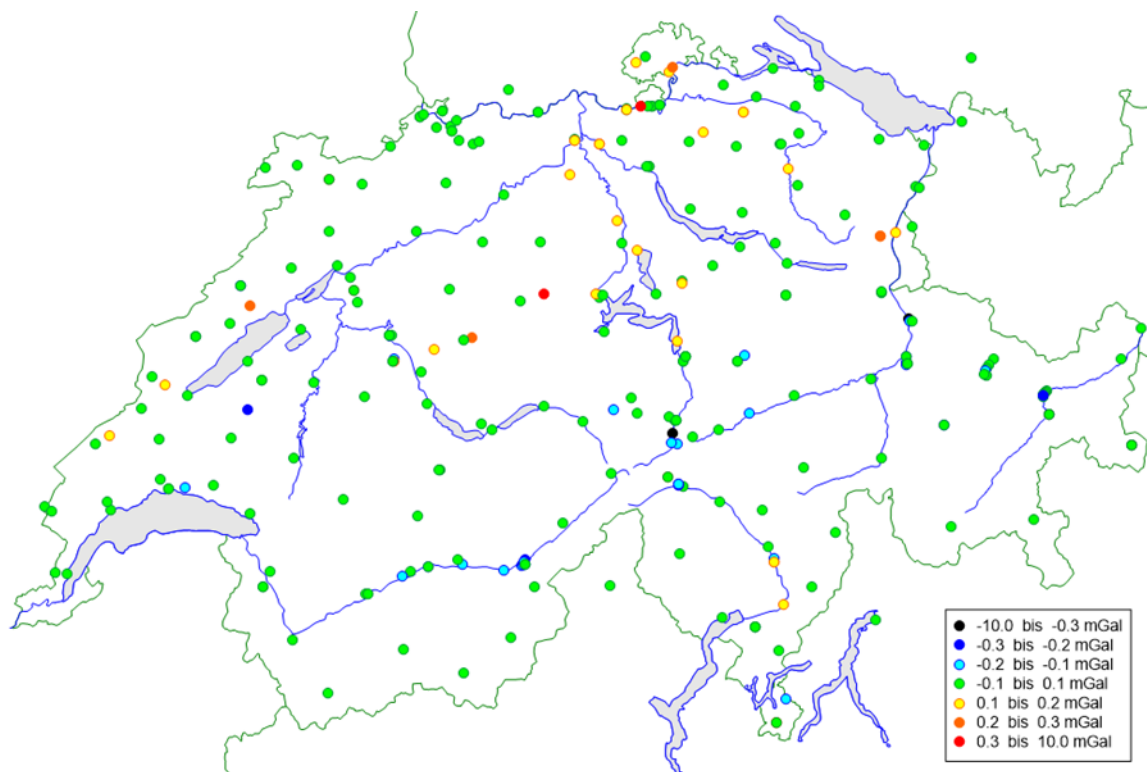


Abbildung 13-4: Vergleich des LSN mit den Schweremessungen 1990–2003

Und schliesslich sind in Abbildung 13-5 noch die Unterschiede zwischen dem LSN und den seit 2004 gemessenen Schweren für das LHN dargestellt. Hier ist der allergrösste Teil der Differenzen kleiner als 0.1 mGal (Standardabweichung 0.04 mGal). Die grössten Unterschiede kommen auf Punkten vor, welche sehr hoch über Boden liegen oder auf Punkten, in deren unmittelbarer Umgebung grössere Umbauarbeiten stattgefunden haben.

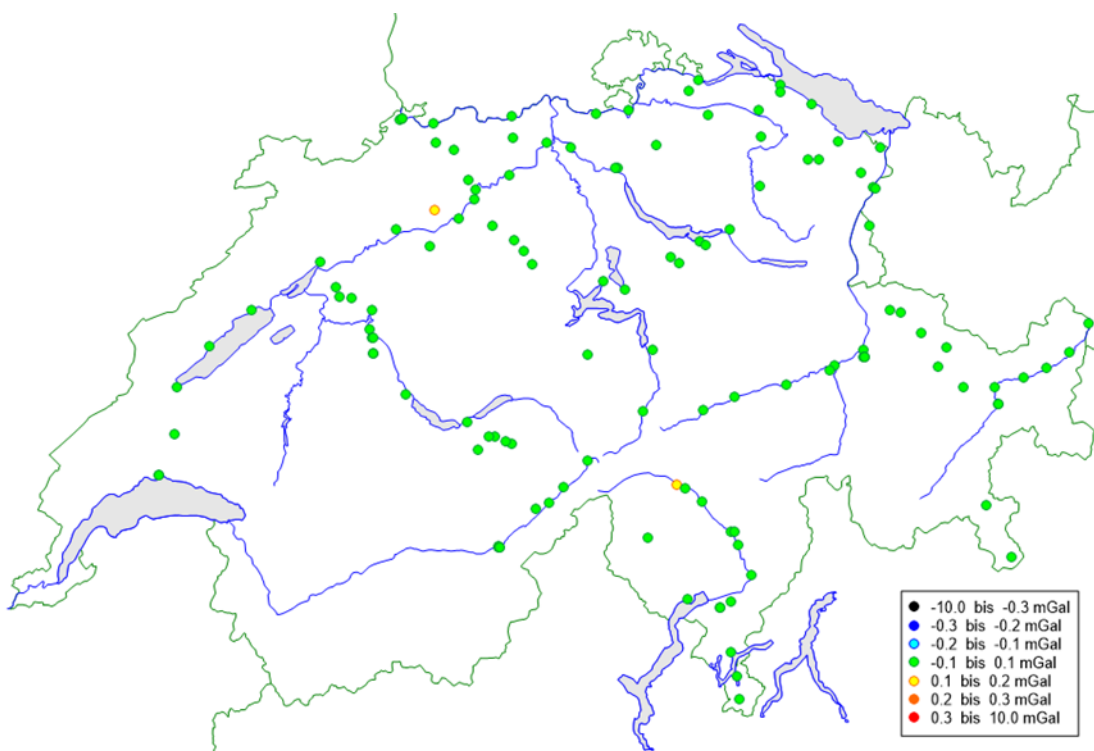


Abbildung 13-5: Differenzen LSN minus LHN seit 2004

14 Zusammenfassung, Ausblick

Das Landesschwerenetz (LSN) dient als Grundlage aller gravimetrischen Messungen in der Schweiz. Dessen Punkte sollen in allen geodätischen und geophysikalischen Arbeiten als Anschlusspunkte verwendet werden, um die Konsistenz der gravimetrischen Landesaufnahme langfristig zu sichern.

In den Jahren 2003 bis etwa 2009 wurde das LSN aufgebaut, erstmals gemessen und ausgewertet. Es basiert auf dem Schweregrundnetz 1995 (SG95), hat aber auch Verknüpfungen zu noch älteren Schwerenetzen und wurde gezielt durch neue Stationen ergänzt. Ziel dieser Aufbauphase war die langfristige Sicherung dieses Netzes und dessen Dokumentation. Dies bedingte, dass der Unterhalt des Schwerenetzes zu swisstopo transferiert und zu einer hoheitlichen Aufgabe wurde. Dazu benötigte es zunächst auch einen Wissensaufbau bei swisstopo für gravimetrische Messungen und deren Auswertung.

Das Rückgrat des LSN sind hochpräzise absolute Schweremessungen auf etwa 15 Punkten. Diese werden regelmässig durch das METAS mit dem FG5 durchgeführt. Ziel ist es, dass eine Absolutstation alle 10 Jahre neu beobachtet wird. Verdichtet wird das LSN durch relative Schweremessungen in einem hierarchisch aufgebauten Netz, welches heute aus etwa 400 Punkten besteht.

Seit etwa 2010 wird das LSN unterhalten und weiter verdichtet. Heute weisen die allermeisten Punkte des LSN einen mittleren Schwerewert mit einer Genauigkeit zwischen 2 und 8 μGal auf. Die Daten werden in einer Datenbank (FiDa) verwaltet und für die Dokumentation und die Abgabe an Benutzer sind vor allem Punktlisten und die Plattform map.geo.admin.ch vorgesehen.

Der Unterhalt des LSN ist eine permanente Aufgabe der Landesvermessung. Dies hat in erster Linie den Zweck, die Aktualität des Netzes zu garantieren und auch langfristig die Stabilität der Schwerewerte zu überwachen. Ein Fernziel ist es auch, dass die Schweredaten einen Beitrag zur Modellierung der rezenten Krustenbewegungen in der Schweiz liefern können.

15 Danksagung

Der Aufbau des LSN erfolgte unter Beteiligung vieler Mitarbeiter von verschiedenen Institutionen, welchen hiermit herzlich gedankt sei.

Das METAS führte sämtliche Absolutmessungen seit 2003 durch und wertete diese aus. Insbesondere zu erwähnen ist die Mithilfe von: Philippe Richard und Henri Baumann.

Die ETH Zürich (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Institut für Geophysik), die Schweizerische Geodätische Kommission und die Schweizerische Geophysikalische Kommission leisteten wichtige Vorarbeiten, beschafften Instrumente und beteiligten sich an den Messungen: Emile Klingelé, Beat Bürki, Felix Arnet, Sébastien Guillaume und Yara Rossi.

Die Universität Lausanne stellte Instrumente zur Verfügung und beteiligte sich an den Messungen: Raymond Olivier, Bertrand Dumont, György Hetényi, Ludovic Baron und Matteo Scarponi.

Die Firmen RBR Geophysics und geo2x stellten Instrumente zur Verfügung und beteiligten sich an den Messungen: Pier-Vittorio Radogna, David Dupuy, Mathieu Beck, Elisa Tamagnone und Alberto Rosselli.

Die Uni Neuchâtel beteiligte sich an Messkampagnen und stellte uns Daten zur Verfügung: Guillaume Mauri und Laurent Marguet.

Die Bayerische Akademie der Wissenschaften beteiligte sich an Messungen auf der Eichstrecke Interlaken–Jungfrauoch: Christian Gerlach.

Den Kolleginnen und Kollegen des Bereichs Landesgeologie von swisstopo danken wir sehr herzlich für die stete Unterstützung der Arbeiten. An den Messungen beteiligt haben sich folgende Mitarbeiter/innen und Praktikant/innen in (mehr oder weniger) chronologischer Reihenfolge: Maria Ponzio, Valentin Zuchuat, Pascal Kuhn, Anna Rauch, Dorota Czerski, Angelo Milani und Anja Amrein.

Und schliesslich haben sich auch sehr viele Mitarbeiter/innen und Praktikant/innen der Geodäsie und Vermessung beteiligt (ebenfalls ungefähr chronologisch): Andreas Schlatter, Bruno Mattli, Adrian Wiget, Elmar Brockmann, Robin Schittli, Pauline Emery, Peter Soukal, Sebastian Condamin, Christian Baumann, Christian Peier, Beat Klossner, Stefan Schönenberger, Thomas Seiler, Martino Isidori, Jürg Liechti, Flurin Hügi, Jor Fergus Dal, Daniel Willi, Marc Nicodet und Marin Smolik.

Referenzen

- ACIC (1971): World Relative Gravity Reference Network (Update Europe). Aeronautical Chart and Information Center. United States Airforce. ACIC Reference Publication No. 25.
- Arnet F. und E. Klingelé (1997): SG95: Das neue Schweregrundnetz der Schweiz. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. Band 54. Schweizerische Geodätische Kommission. 1997.
- Berrino G. (2020): The state of the art of gravimetry in Italy. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali* (2020) 31 (Suppl 1):S. 35–48. <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00924-8>
- Boedecker G. (1993): The International Absolute Gravity Basestation Network (IAGBN). Status 1992. In: *Geodesy and Physics of the Earth. Geodetic Contributions to Geodynamics. IAG Symposia Series 112.* Springer Verlag.
- Boedecker G. (2007): Unified European Gravity Network (UEGN02). Final Report. Veröffentlichungen der Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. *Astronomisch-Geodätische Arbeiten.* Vol. 63.
- Boedecker G., I. Marson, HG Wenzel (1995) : The Adjustment of the Unified European Gravity Network 1994 (UEGN94). In. *Gravity and Geoid. IAG Symposia Series no. 114.*
- Brockmann E, U. Marti, A. Schlatter, D. Schneider (2004): CH-CGN activities in Switzerland (Swiss Combined Geodetic Network). *Swisstopo-Report 03-41.*
- Chablais H. (1967): Rapport à la Commission géodésique suisse sur la campagne de gravimétrie 1966.
- Condamin S. (2016): Validierung von Schweregradienten auf LSN2004 Punkten. Master-Thesis 2016 Nr. 7 der Fachhochschule Nordwestschweiz.
- Condamin S. und U. Marti (2017): Analyse Schweregradienten im LSN2004. *Swisstopo-Report 17-06.*
- Cotugno J. und T. Duewell (2017): Gravity and Geoid Determination. Geodetic Project Course. CERN 2017. ETH Zürich, 2017.
- Faller J. (2002): Thirty years of progress in absolute gravimetry: a scientific capability implemented by technological advances. *Metrologia* 39 425.
- Fischer W. (1962): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über die Messungen 1962 im Schwerenetz erster Ordnung.
- Fischer W. (1964): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über die Schweremessungen erster Ordnung des Jahres 1963.
- Fischer W. (1965a): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über die Schweremessungen erster Ordnung des Jahres 1964.
- Fischer W. (1965b): Schweizerische geodätische Kommission. Bericht über die in den Jahren 1962–1965 ausgeführten gravimetrischen Arbeiten in der Schweiz.
- Fischer W. (1966): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über die Schweremessungen erster Ordnung des Jahres 1965.
- Fischer W. (1969): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über die Erstellung eines Kontrollnetzes über das schweizerische Schwerenetz mit LaCoste-Romberg-Gravimetern.
- Fischer W. (1970): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über die Ausgleichung des Kontrollnetzes über das schweizerische Schwerenetz.
- Fischer W. (1981): Ausgleichungen der ersten Schweremessungen auf der Gravimeteereichlinie Interlaken-Jungfrauoch. VPK 11/1981.
- Fischer W. (1983): Das Nationale Schwerenetz der Schweiz (Swiss National Gravity Net, SNGN). Teil 1: Messungen mit LaCoste-Romberg Gravimetern. IGP-Bericht Nr. 68. ETH Zürich.
- Fischer W. (1984): Schweremessungen längs der Lötschberg-Linie des eidg. Landesnivellements. IGP-Bericht Nr. 82. ETH Zürich.

- Gonet O. (1965): Etude gravimétrique de la plaine du Rhône. Géophysique No. 6. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Hunziker E. (1959): Gravimetermessungen in den Jahren 1953 bis 1957. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch-Geodätische Arbeiten in der Schweiz. Band 25.
- Hunziker E. (1960): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über den Entwurf eines schweizerischen Schwerenetzes erster Ordnung.
- Hunziker E. (1962): Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission über Vorbereitungen zur Erstellung des schweizerischen Schwerenetzes erster Ordnung und über die nachträgliche Berechnung der mittleren Fehler der Schweregrundnetz-Stationen.
- Kahle H.G., P.Cagienard, St. Mueller, I. Marson, F. Chaperon (1981): Absolute Schweremessungen in der Schweiz als Basis für geodynamische Untersuchungen zur aktuellen Alpentektonik. VPK 7/1981.
- Klingelé E. (1972): Contribution à l'étude gravimétrique de la Suisse romande et des régions avoisinantes. Géophysique No. 15. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Klingelé E. und R. Olivier (1980): La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse (anomalies de Bouguer). Géophysique No. 20. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Klingelé E. und HG Kahle (1981): Une ligne de calibration gravimétrique Interlaken-Jungfrauoch (Suisse). VPK 1/1981.
- Klingelé E. und H. Schwendener (1984): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Gravimetrische Messungen 81/82. NAGRA Technischer Bericht 84-22.
- Klingelé E. (1991): Gravimétrie appliquée. Vorlesungsskript. ETH Zürich.
- Klingelé E., M. Cocard, M. Halliday, H.-G. Kahle (1996): The Airborne Gravimetric Survey of Switzerland. Géophysique No. 31. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Kneissl M. (1958): Pendel- und Gravimetermessungen auf den europäischen Gravimeter-Eichlinien. Bayerische Akademie der Wissenschaften. Neue Folge Heft 86.
- Kneissl M., K. Marzahn (1962): Vorschläge und Schlussergebnisse des europäischen Gravimeter-Eichsystems. Bayerische Akademie der Wissenschaften. Neue Folge Heft 112.
- Kobold F. (1962): 1861-1961. Festschrift anlässlich des 100jährigen Bestehens der Schweizerischen Geodätischen Kommission.
- Lederer M. (2009): Accuracy of the Relative Gravity Measurement. Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 6, No. 3 (155), p. 383–390.
- Longman I.M. (1959) Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. Journal of Geophysical Research Vol. 64. Issue 12, p. 2351–2355.
- Messerschmitt JB (1897): Relative Schwerebestimmungen. Erster Teil. Schweizerische Geodätische Kommission. Band 7.
- Marson I. (2012): A Short Walk along the Gravimeters Path. International Journal of Geophysics. Volume 2012, Article ID 687813. doi:10.1155/2012/687813.
- Marson I. und C. Morelli (1978) First order gravity net in Italy. Boll. Geodesia e Scienze Affini I.G.M., 4: 659–689.
- Marson I., F. Palmieri (1994): Rete gravimetrica italiana. Stato attuale prospettive future. Boll. Geodesia e Scienze Affini I.G.M., L III, 2, p. 161–172.
- Marti U. (2017): Gravimeter-Eichstrecke Interlaken–Jungfrauoch. Arbeiten in den Jahren 2010–2016. Swisstopo-Report 17-04.
- Marti U., S. Condamin (2021): Inbetriebnahme und Kalibrierung des Relativgravimeters CG-6. Swisstopo-Report 20-11.
- Marti U., Ph. Richard (2006): LSN2004: Landesschwerenetz 2004. Station Brig. Swisstopo-Report 05-14.

- Marti U., Ph. Richard (2007): Landesschwerenetz 2004. Einrichten der absoluten Schwerestation Basel und Absolutmessungen 2006. Swisstopo-Report 07-11.
- Marti U., H. Baumann (2010a): Absolute Schweremessungen 2007–2010. Messungen für das LSN2004 auf den Stationen Andermatt, Zernez, Lausanne, Zürich und Monte Ceneri Swisstopo-Report 10-12.
- Marti U., H. Baumann (2010b): Absolute und relative Schweremessungen 2007–2010. Messungen für das LSN2004 auf den Stationen Zimmerwald und Wabern. Swisstopo-Report 10-13.
- Marti U., H. Baumann, B. Bürki und Ch. Gerlach (2016): A First Traceable Gravimetric Calibration Line in the Swiss Alps. In: IGFS 2014 (Jin and Barzaghi, eds.). Proceedings of the 3rd International Gravity Field Service (IGFS), Shanghai, China, June 30 – July 6, 2014. IAG Symposia Series Nr. 144. DOI 10.1007/1345_2015_52, Springer Verlag, 2016.
- Marti U., D. Schneider (2005): Landesschwerenetz LSN 2004. Konzept für eine neue gravimetrische Landesvermessung der Schweiz. Swisstopo-Report 04-08.
- Marti U., Ph. Richard, PV Radogna (2005): Landesschwerenetz LSN 2004. Absolute und relative Schwere-messungen auf dem Fundamentalpunkt Zimmerwald 2004–2005 und Verbindung mit der Schwerestation am METAS. Swisstopo-Report 04-10.
- Morelli C., C. Gantar, T. Honkasalo, R. McConnell, B. Szabo, J. Tanner, U. Uotila, C. Whalen (1972): The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71). AD/A-006 203. National Technical Information Service. US Department of Commerce. 1972.
- Olivier R., B. Dumont und E. Klingelé (2010): L'atlas gravimétrique de la Suisse. Géophysique No. 43. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Plantamour E. (1866): Expériences faites à Genève avec le pendule à réversion. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Plantamour E. (1872): Nouvelles expériences faites avec le pendule à réversion et détermination de la pesanteur à Genève et au Righi-Kulm. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Plantamour E. (1873): Observations faites dans les Stations Astronomiques Suisses: Righi-Kulm, Weissenstein, Observatoire de Berne. Schweizerische Geodätische Kommission.
- Poldini E. (1963): Les Anomalies gravifiques du Canton de Genève. Géophysique No. 4. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Rieckmann E., S. German (1957): Das Potsdamer Schweresystem, seine vollständige Definition und seine richtige Übertragung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 50.
- Ruess D. und W. Gold (2002): The Austrian Gravity Base Net 1995. VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation " 84 (3), S. 275–283.
- Schlatter A., U. Marti, B. Mattli (2005): Gravimetrie für das Landeshöhennetz. Mess- und Auswerteverfahren. Resultate der Messungen 2004. Swisstopo-Report 03-37.
- Schlatter A. (2007): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. Band 72 der Schweizerischen Geodätischen Kommission.
- Schneider D., W. Gurtner, U. Marti, E. Brockmann, A. Wiget (2003): «CH-CGN-1»: Swiss contribution to the European Combined Geodetic Network (ECGN). Swisstopo-Report 03-13.
- Schürer M. (1944): Die Reduktion und die Ausgleichung des Schweizerischen Landesnivellements. Annexe aux procès-verbal der 88. Sitzung der Schweizerischen Geodätischen Kommission.
- Schweizerische Geodätische Kommission (1910): Schwerebestimmung in den Jahren 1900–1907. Astronomisch-Geodätische Arbeiten in der Schweiz. Band 12.
- Schweizerische Geodätische Kommission (1911): Polhöhen- und Schwerebestimmungen bis zum Jahre 1910. Astronomisch-Geodätische Arbeiten in der Schweiz. Band 13.
- Schweizerische Geodätische Kommission (1916): Schwerebestimmung in den Jahren 1911 bis 1914. Astronomisch-Geodätische Arbeiten in der Schweiz. Band 15.

- Schweizerische Geodätische Kommission (1921): Schwerebestimmung in den Jahren 1915 bis 1918. Astronomisch-Geodätische Arbeiten in der Schweiz. Band 16.
- Swisstopo (2020): Geodätische Landesvermessung Schweiz – Nachführungskonzept 2019. Swisstopo-Report 20-04.
- Tamura, Y. (1987): A harmonic development of the tide-generating potential, Bulletin d'Informations Marées Terrestres 99, 6813–6855, Bruxelles.
- Wagner J.J. (1970): Elaboration d'une carte d'anomalie de Bouguer. Etude de la vallée du Rhône de St.Maurice à Saxon. Géophysique No. 9. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Verdun J., E. Klingelé, R. Bayer, M. Cocard, A. Geiger, H.-G. Kahle (2003): The alpine Swiss-French airborne gravity survey. Geophys. J. Int. 152, 8–19.
- Wenzel, H.-G. (1996): The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package ETERNA 3.30. Bulletin d'Informations Mareés Terrestres, 124, p. 9425–9439.
- Wilmes H., L. Vitushkin, V. Palinkas, R. Falk, H. Wziontek, S. Bonvalot (2016) : Towards the Definition and Realization of a Global Absolute Gravity Reference System. In: IAG Symposia 147.
- Wilmes H., H. Wziontek, R. Falk, S. Bonvalot (2009): AGrav - The New International Absolute Gravity Database of BGI and BKG and its benefit for the Global Geodynamics Project (GGP). Journal of Geodynamics, Vol. 48. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.09.035>.
- Wziontek H., S. Bonvalot, R. Falk, G. Gabalda, J. Mäkinen, V. Palinkas, A. Rülke, L. Vitushkin (2021): Status of the International Gravity Reference System and Frame. J Geod 95, 7 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>.



Anhang

A1 Stationscharakteristiken

In dieser Tabelle sind einige Informationen zu den aktuellen Punkten des LSN zusammengefasst. Dies beinhaltet die Identität mit LFP und HFP. Detailbeschreibungen der Punkte sind in den entsprechenden Punktprotokollen auf map.geo.admin.ch zu finden.

Die Spalten mit den Farbcodes (grün: in Ordnung; gelb: es geht so; rot: problematisch) enthält folgende Informationen:

N: Anschluss ans Nivellement
▪ Ans Landesnivellement (LN) angeschlossen
▪ An kantonalem oder kommunalem Nivellement angeschlossen
▪ Am LN über trigonometrische Messungen angeschlossen
▪ Am LN angeschlossen, aber Punkt wurde deklassiert
▪ Höhe grob aus benachbarten Punkten bestimmt
▪ Nicht am Nivellement der Schweiz angeschlossen. Die Höhen stammen von GNSS, Triangulation, ausländischen Punktverzeichnissen (ohne Anpassung des Höhensystems) oder wurden einfach aus der Karte gelesen.
P: Platzierung, Aufstellen des Gravimeters
▪ Problemlos
▪ Aufstellung kann problematisch sein (wenig Platz, Boden uneben oder schräg)
▪ Punkt ist öfters überstellt oder nicht zugänglich
▪ Untergrund ist schlecht für Gravimetermessungen (Gras, Schotter, ...)
▪ Aufstellung problematisch (sehr wenig Platz)
▪ Das hohe Stativ muss benutzt werden wegen unebenem oder schrägem Boden
Z: Zugang, Zufahrt
▪ Problemlos
▪ Der Zugang muss vorangemeldet werden oder es muss ein Schlüssel organisiert werden
▪ Kleinerer Fussmarsch
▪ Zaun muss überklettert werden oder sonstiger erschwerter Zugang
▪ Eine Bahn oder Seilbahn muss benutzt werden
▪ Der Zugang muss mehrere Tage im Voraus organisiert werden
▪ Die Zufahrt ist weit oder über schlechte Strassen
▪ Längerer Fussmarsch
S: Stabilität
▪ Keine Hinweise auf Instabilität
▪ Moderate oder nur zeitweise Erschütterungen (meist durch Verkehr)
▪ Leichte Bodensenkungen oder veränderlicher Grundwasser- oder Seespiegel
▪ Dauernde starke Erschütterungen
▪ Stark ändernder Grundwasserspiegel

Die weiteren Spalten der Tabelle geben folgende Informationen:

L: Einige Angaben zu speziellen Lagen des Punktes:

- G: im Innern eines Gebäudes
- T: im Tunnel
- R: auf Reservoir
- S: in Schacht

Ø: Durchmesser des Schachts in cm (PP = kleiner Polygon-Schacht)

HP: Höhe des Punktes über/unter Boden in cm



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
0001	Zimmerwald Ref		BES 484	T4H D					G		10
0001.0	Zimmerwald Abs		BES 94s	T0V GRAV					G		0
0001.1	Zimmerwald 800	11868001	BES 498	T0V 800							0
0001.2	Zimmerwald 8002	11868002	BES 93s	T0V 8002							0
0002.0	Zürich Abs		ZH 1299	T0V GRAV					G		0
0002.1	Zürich Base		ZH 1300	T0V GRAV					G		0
0003.0	Lausanne Abs		VDO 470	T0V LAUS					G		0
0003.1	Lausanne Exz		VDO 467	T0V 2							0
0003.2	Lausanne B2		VDO 219s	T0V B2							0
0003.3	Lausanne B3		VDO 220s	T0V B3							0
0003.4	Lausanne B1		VDO 218s	T0V B1							0
0004.0	Wabern WAN A		BES 91s	D2V A					G		0
0004.1	Wabern WAN B		BES 90s	D2V B					G		0
0004.3	Wabern Exz		BES 463	T4V B							0
0004.4	Wabern 1997		BES 1167	T0V 1997					G		0
0004.5	Wabern WAN C		BES 1168	T0V C					G		0
0004.6	Wabern WAN D		BES 1169	T0V D					G		0
0005.0	Basel Abs		BS 19s	T0V 1					G		0
0005.1	Basel Exz		BS 2	T4V IV							0
0006	Brig Ref		VSD 354a	T4H K					G		30
0006.0	Brig Abs		VSD 90s	T0V 2					G		0
0006.1	Brig Exz		VSD 426	T0V 1							0
0007.0	Andermatt Abs		UR 344	T0V 2					G		0
0007.1	Andermatt Exz		UR 343	T0V 1							0
0008	M.Ceneri Ref		TI 489	T4H W							41
0008.0	M.Ceneri Abs		TI 174s	T0V 12					G		0
0008.1	M.Ceneri Exz		TI 173s	T0V 11							0
0009	Chur Ref		GR1 382a	T4H M					G		25
0009.0	Chur Abs		GR1 262s	T0V GRAV					G		0
0009.2	Chur Exz 2		GR1 551	T4V T							0
0010.0	Zernez Abs		GR3 559	T0V 4					G		0
0010.2	Zernez Exz2		GR3 574	T0V 3A							0
0012.0	Interlaken_alt Abs		BEO 109s	T0V GRAV					G		0
0012.1	Interlaken_alt Exz		BEO 9s	T0V A							0
0012.2	Interlaken_neu Abs		BEO 1108	T0V GRAV					G		0
0012.3	Interlaken_neu Exz		BEO 1107	T0V EXZ							0
0013.2	Jungfrauoch2013		VSD 1000	T0V GRAV					G		0
0013.3	Jungfrauoch Exz E		VSD 1002	T0V E					T		0
0013.4	Jungfrauoch VP1		VSD 1003	T0V VP1					T		0
0013.6	Jungfrauoch VP3		VSD 1004	T0V VP3					G		0
0013.7	Jungfrauoch LV95	12492500	VSD 1001	T5V 250					G		0
0013.8	Jungfrauoch GP		VSD 1222	T0V GP					G		0
0014.0	Bäzberg Abs		UR 1213	T0V GRAV					T		0
0014.1	Bäzberg Exz		UR 1214	T4V 10N					T		0
0015.0	Guspisbach Abs		TI 1707	T0V GRAV					T		0
0015.1	Guspisbach exz		TI 1708	T4V 27S					T		0
0016.0	Mont Terri Niche HE		JU 1041	D2V 43					T		0
0016.1	Mont Terri Südportal		JU 1042	D2V 101					S	30	-16
0017.1	CERN PREV		FRA 1000	D2V PREV					G		0
0017.2	CERN Pt4		FRA 1001	D2V PT4					G		0
0018.0	Alpiglen		BEO 1161	T0V GRAV					G		0
0018.1	Alpiglen alt		BEO 1168	T0V GRAV							0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
0019.0	Grindelwald		BEO 1106	T0V GRAV					T		0
0019.1	Grindelwald Exz		BEO 1105	T0V EXZ							0
0019.2	Grindelwald alt		BEO 1169	D1H 906							0
0019.3	Grindelwald Bhf		BEO 662g	T0V GRAV							0
0019.4	Grindelwald Bhf niv		BEO 662	D1H 3560							20
0020.0	Kleine Scheidegg abs		BEO 1162	T0V GRAV					G		0
0020.1	Kleine Scheidegg alt		BEO1198	T0V ALT							0
0020.2	Kleine Scheidegg S1		BEO 1199	T0V S1							0
0021.0	Eigergletscher abs		BEO 1163	T0V GRAV					G		0
0022.0	Eigerwand abs		BEO 1164	T0V GRAV					T		0
0022.1	Eigerwand alt		BEO 1200	T0V ALT					T		0
0022.2	Eigerwand LFP G	12293351	BEO 1201	T0V 335G					T		0
0030.0	Freiburg Abs3		DEU 1002	D3V 193					G		0
0031.1	Wangen 1		DEU 1003	D3V 211					G		0
0031.5	Wangen 5		DEU 1004	D3V 215					G		0
0033.0	Tisis Abs		AUT 31	D3V 462G					G		0
0033.1	Tisis Exz		AUT 30	D3V 462F							0
0034.0	Koblach Abs		AUT 14	D3V 548J					G		0
0034.1	Koblach Exz		AUT 12	D3V 548I							0
0035.0	Pfänder abs		AUT 1000	D3V ABS					G		0
0035.1	Pfänder Exz		AUT 1001	D3V EXZ							0
0043.0	Chaux-Neuve		FRA 1002	D3V 207A							0
0044.0	Echenevex		FRA 1003	D3V 303A							0
0045.0	Corbonod-Gignez		FRA 1004	D3V 803A							0
0048.0	Chamonix-Montroc		FRA 1005	D3V 619B							0
0051.0	Beaumont (Piton)	13011000	FRA 1006	T5V 101A							0
0053.0	Courtefontaine		FRA 1007	D3V 404B							0
0055.0	Grande-Riviere		FRA 1008	D3V 8AB							0
0056.0	Oltingue		FRA 1009	D3V 806A							0
0057.1	Vacheresse a		FRA 1010	D3V 601A							0
0058.0	Vers		FRA 1011	D3V 602B							0
1001	Versoix		GE 59	T4V 55							0
1002	Payerne Ref		VDE 115a	T4H M							36
1002.1	Payerne		VDE 115g	T0V GRAV							0
1003	Monthey		VSF 132	T4V 50							0
1004	Porrentruy Ref		JU 142	T4H 30							95
1004.1	Porrentruy		JU 142g	T0V GRAV							0
1005	Biel/Bienne Ref		BEN 70	T5H F							25
1005.1	Biel/Bienne		BEN 70g	T0V GRAV							0
1006	Pfynwald		VSD 191	T4V C							0
1007	Thun	12075000	BEO 596	T5V 500							0
1010	Menzberg	11492000	LU 1282	T5V 200							0
1011	Siblingen	10313660	SH 106	T5V 366							0
1012	Altdorf Ref		UR 16	T1V 68							-5
1012.1	Altdorf Niv		UR 16g	T0V GRAV							0
1013	Galgenen		SZ 136	T4V 27							0
1014	Acquarossa		TI 169s	T0V 24a							0
1015	Mendrisio		TI 399	T1V 195							0
1016	Weinfelden Ref		TG 93	H1H 336							16
1016.1	Weinfelden		TG 93g	T0V GRAV							0
1018	Maloja	12766000	GR3 482	T5V 600							0
1019	Aarburg		AG 471	T3V 117							0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
2001	Bossy MN95	12810000	GE 1000	T5V 000	■	■	■	■	S	30	-19
2002	La Givrine	12608000	VDO 453	T5V 800	■	■	■	■			0
2003	Le Lieu	12216000	VDO 454	T5V 600	■	■	■	■			0
2004	Essertines	12418000	VDO 1000	T5V 800	■	■	■	■	S	30	-23
2005	Col des Etroits	11826210	VDO 455	T5V 621	■	■	■	■			0
2006	La Sarraz	12227000	VDO 457	T5V 700	■	■	■	■			0
2007	Echandens	12427000	VDO 456	T5V 700	■	■	■	■	S	30	-20
2008	Travers	11634000	NE 345	T5V 400	■	■	■	■	R		0
2009	Savigny	12437000	VDE 1025	T5V 700	■	■	■	■	S	30	-20
2010	Moudon	12241000	VDE 1026	T5V 100	■	■	■	■	S	30	-20
2011	La Chaux-de-Fonds	11442000	NE 346	T5V 200	■	■	■	■	S	30	-16
2012	Forel MN95	11843000	FR 1000	T5V 300	■	■	■	■	S	30	-23
2013	Chailly	12644000	VDE 1027	T5V 400	■	■	■	■			0
2014	Fahy	10846000	JU 1000	T5V 600	■	■	■	■	S	30	-18
2015	St. Triphon	12847000	VDE 502	T5V 700	■	■	■	■			0
2016	Chasseral	11252000	BEJ 41s	T5V 200	■	■	■	■			0
2017	La Tour-de-Trême	12252000	FR 360	T5V 200	■	■	■	■			0
2018	Martigny	13252000	VSF 87s	T5V 200	■	■	■	■	G		0
2018.1	Martigny RAB	13252001	VSF 363	T5V 2001	■	■	■	■			0
2019	Vully	11653000	FR 1001	T5V 300	■	■	■	■	S	30	-17
2020	Fribourg MN95	11855000	FR 1002	T5V 500	■	■	■	■	R		0
2021	Les Rangiers	10857000	JU 188	T5V 700	■	■	■	■	S	30	-23
2022	Reconvilier	11057000	BEJ 1000	T5V 700	■	■	■	■	S	30	-16
2023	Bourg St.Pierre	13457000	VSF 336	T5V 700	■	■	■	■			0
2024	Saanen	12460410	BEO 598	T5V 41	■	■	■	■			0
2024.1	Saanen neu	12460411	BEO 701	T5V 0411	■	■	■	■			0
2025	Seedorf	11463000	BEN 1078	T5V 300	■	■	■	■	S	30	-17
2026	Guggisberg	12064000	BES 1073	T5V 400	■	■	■	■	S	30	-18
2027	Sion	13064000	VSF 335	T5V 400	■	■	■	■			0
2028	Metzerlen	10668000	SO 1065	T5V 800	■	■	■	■	S	30	-21
2029	Ringgenberg	12087330	BEO 616	T5V 733	■	■	■	■			0
2030	Les Haudères	13271000	VSF 1001	T5V 100	■	■	■	■			0
2031	Riedholz	11073000	SO 215	T5V 300	■	■	■	■	S	30	-19
2032	Engstligenalp	12673000	BEO 1165	T5V 300	■	■	■	■			0
2033	Chrischona	10477000	BS 41	T5V 700	■	■	■	■			0
2034	Vogelberg	10878690	SO 1066	T5V 869	■	■	■	■			0
2034.1	Vogelberg HP		SO 1092	T0V GRAV	■	■	■	■			0
2035	Lueg	11478000	BEN 1077	T5V 800	■	■	■	■	S	30	-24
2036	Jeizinen	12880000	VSD 1005	T5V 000	■	■	■	■			0
2037	Signau	11681000	BES 499	T5V 100	■	■	■	■	S	30	-19
2038	Zermatt	13481000	VSD 405	T5V 100	■	■	■	■			0
2040	Sissacherfluh	10684000	BL 1000	T5V 400	■	■	■	■			0
2041	Langenthal	11284000	BEN 1079	T5V 400	■	■	■	■	S	30	-17
2043	Wartburg	10888000	AG 1160	T5V 800	■	■	■	■			0
2045	Saas Fee	13290000	VSD 1006	T5V 000	■	■	■	■			0
2046	Simplon	12894000	VSD 420	T5V 400	■	■	■	■			0
2047	Laufenburg LV95	10494000	AG 70s	T5V 400	■	■	■	■	G		0
2048	Knutwil	11295000	LU 357	T5V 500	■	■	■	■	S	30	-17
2049	Brienz	12095000	BEO 597	T5V 500	■	■	■	■	S	30	-15
2050	Fieschertal	12698000	VSD 1007	T5V 800	■	■	■	■			0
2051	Lenzburg	10900000	AG 1161	T5V 000	■	■	■	■	S	PP	-23
2052	Alpnach	11705000	NW 1020	T5V 500	■	■	■	■			0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
2053	Grimsel	12507000	VSD 419	T5V 700							0
2054	Crodo d'Ossola	12906000	ITA 1012	T5V 600							0
2055	Lägern	10710000	ZH 1301	T5V 000							0
2056	Sins	11308000	AG 636	T5V 800					S	30	-17
2058	Hönggerberg	10913000	ZH 76s	T5V 300							0
2059	Oberarth	11515000	SZ 171	T5V 500					S	40	-21
2060	Buchberg	10516000	SH 107	T5V 600					S	30	-15
2061	San Gottardo alt	12517000	TI 511	T5V 700							0
2061.1	San Gottardo neu	12517060	TI 608	T4V 706							0
2062	Bignasco	12920000	TI 1639	T5V 000							0
2063	Altdorf LV95	11920000	UR 308	T5V 000					S	40	-26
2064	Brütten	10721000	ZH 1302	T5V 100							0
2065	Pfannenstiel	11121000	ZH 1303	T5V 100							0
2066	Oberalp	12322000	UR 311	T5V 200							0
2067	Einsiedeln	11325000	SZ 185	T5V 500							0
2068	Dalpe	12526000	TI 1640	T5V 600							0
2069	Stammheim	10526000	ZH 1304	T5V 600					S	40	-24
2070	Ascona	13126000	TI 514	T5V 600							0
2071.1	Schauenberg neu	10730500	ZH 1305	T5V 050					S	50	-17
2072	Klausenpass	11930000	UR 309	T5V 000					S	40	-28
2073	Bachtel	11131000	ZH 1306	T5V 100					S	30	-19
2074	Biasca alt	12735000	TI 512	T5V 500					S	PP	-16
2074.1	Biasca neu	12735500	TI 527	T5V 550							0
2076	Sonvico	13336000	TI 1641	T5V 600							0
2077	Generoso EUREF	13537000	TI 1642	T5V 700							0
2077.1	Generoso LV95	13537310	ITA 1015	T5V 731							0
2077.2	Generoso 23F	13537250	TI 1709	T0V 23F							0
2078	Glarus	11537000	GL 146	T5V 700					S	40	-25
2079	Brigels	12140000	GR1 1035	T5V 000							0
2080	Nollen	10740000	TG 1000	T5V 000					R		0
2081	Oberhelfenschwil	10940000	SG 1419	T5V 400					R		0
2082	Zervreilasee	12341000	GR1 1036	T5V 100					S	40	-33
2083	Dettighofen	10544000	TG 1001	T5V 400					S	40	-20
2084	Mesocco	12746000	GR3 481	T5V 600							0
2085	Schwägalp	11148000	AR 1002	T5V 800							0
2086	Bonaduz	11953000	GR1 530	T5V 300					S	40	-50
2087	Colico	13148000	ITA 1013	T5V 800							0
2088	Goldach	10754000	SG 658	T5V 400					R		0
2089	Sargans	11555000	SG 653	T5V 500							0
2090	Andeer	12355000	GR1 531	T5V 500							0
2091	Filisur	12165390	GR2 350	T5V 539					S	40	-22
2092	Pfänder LV95	10768000	AUT 1	T5V 800							0
2093	Davos	11973000	GR2 309	T5V 300					S	40	-28
2094	Berninapass	12782000	GR3 534	T5V 200							0
2095	Zernez	12184000	GR3 483	T5V 400							0
2096	Ramosch	11996000	GR3 1000	T5V 600							0
2097	Santa Maria	12398000	GR3 484	T5V 800					S	40	-16
2098	St. Margrethen Niv		SG 207	T5H A							35
2098.1	St. Margrethen		SG 207g	T0V GRAV							0
2099	Vinadi		GR3 336	T4V F							0
2100.1	L'Isle		VDO 1031	D1H 133A							0
2100.2	Mont-la-Ville		VDO 1032	D1H B144							0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
2100.3	Mont-la-Ville B		VDO 1033	D1H 141B	■	■	■	■			0
2100.4	Mollendruz		VDO 1034	D1H A138	■	■	■	■			0
2101	Ofenpass	12393000	GR3 565	T5V 300	■	■	■	■			0
3001	Spiez		BEO 45	T5H B	■	■	■	■			33
3001.3	Spiez exz 3		BEO 45g	T0V 3	■	■	■	■			0
3001.4	Spiez exz 4		BEO 45h	T0V 4	■	■	■	■			0
3002	Gampel		VSD 194	T5H 350	■	■	■	■			46
3003	Kandersteg		BEO 448	T4H 48	■	■	■	■			65
3004	Wichtrach		BES 233	T4H 12	■	■	■	■			22
3005	Lachen		SZ 130	T4H K	■	■	■	■			29
3006	Sargans Niv.		SG 35	T1V 147	■	■	■	■			165
3008	Chur Niv		GR1 376	T4H 21	■	■	■	■			29
3009	Reichenau		GR1 148	T1V 200	■	■	■	■			0
3010	Trun		GR1 71	T5H A	■	■	■	■			4
3011	Disentis		GR1 42	T4H A	■	■	■	■			20
3012	Sedrun		GR1 23	H3H 276	■	■	■	■			90
3013	Thusis		GR1 230	T3V 17	■	■	■	■			67
3014	Splügen		GR1 309	T4H 46	■	■	■	■			16
3015	Hinterrhein		GR1 342	T5H 635	■	■	■	■			28
3016	San Bernardino		GR3 64	T4V B	■	■	■	■			0
3017	Roveredo		GR3 9	H3H 1987	■	■	■	■			213
3018	Castione		TI 160	T4H C	■	■	■	■			23
3019	Soazza		GR3 37	T5H A	■	■	■	■			25
3020	Luzern		LU 4	T4V 1	■	■	■	■			0
3021	Birrfeld	10712610	AG 638	T5V 261	■	■	■	■	S	50	-16
3022	Neuchâtel CHYN	PFP3 6165	NE 1009	T0V 6165	■	■	■	■	S	PP	-12
3023	Yverdon		VDO 157	T4H 4	■	■	■	■			41
3024	Oulens		VDO 1035	D1H 459B	■	■	■	■			0
3025	Vevey		VDE 274	T4V 13	■	■	■	■			0
3026	Masans		GR1 389	T4H A	■	■	■	■			40
3027	Illanz		GR1 99a	T4H R	■	■	■	■			26
3028	Bern		BES 12	T4H B	■	■	■	■			47
3029	La Neuveville		BEN 152	H2H 373	■	■	■	■			114
3030	Neuchâtel Obs.		NE 39	T5H 409	■	■	■	■			25
3031	Avenches		VDE 133	T5H B	■	■	■	■			7
3032	Fribourg Cath.		FR 106	T1V 18	■	■	■	■			0
3033	Flamatt		FR 152	T4V B	■	■	■	■			0
3034	Schüpfen		BEN 22	T4H G	■	■	■	■			0
3036	Aarau		AG 498	T3H 146	■	■	■	■			41
3037	Baden		AG 247a	T5H A	■	■	■	■			50
3038	Reiden		LU 133	T4H 5	■	■	■	■			17
3039	Nottwil		LU 93	T4H 24	■	■	■	■			0
3040	Lugano		TI 344	T4V C	■	■	■	■			0
3042	Osogna		TI 142	T4H 30	■	■	■	■			17
3043	Wassen LV95	12118440	UR 319	T5V 844	■	■	■	■			0
3044	Cadenazzo		TI 305	T4H 47	■	■	■	■			28
3045	Münster VS		VSD 68	T4H A	■	■	■	■			25
3046	Gletsch		VSD 23	T3V 202	■	■	■	■			0
3047	Sierre		VSF 1	T1V 81	■	■	■	■			0
3048	Sion Niv		VSF 31	H3H 1620	■	■	■	■			243
3049	Martigny Niv		VSF 79	T5H B	■	■	■	■			45
3050	Rodont		TI 6	T4V B	■	■	■	■			0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
3051	Airolo Bahnhof		TI 35	T5H A							6
3052	Airolo Kirche		TI 32	T4H 26							6
3053	Bignasco niv		TI 285	H3H 563							245
3054	Simplon Hospiz		VSD 272	T2V 30							0
3055	Lalden	12888200	VSD 366	T5V G1							0
3056	Zermatt Kirche		VSD 242	T4H 926							5
3057	Herbruggen		VSD 230a	T4H K							20
3058	St.Niklaus		VSD 225a	T4H E							34
3059	Bulle		FR 50	T4H D							8
3060	Farvagny-le-Grand		FR 81	T5H 659							32
3061	Oensingen		SO 61	T3H 113							16
3062	Olten		SO 85	T5H C							32
3063	Kaiseraugst		AG 156	T5H 310							52
3064	Basel Pauluskirche		BS 18	T5H 548							26
3065	Laufen		BL 140	T4H 9							20
3066	Delémont		JU 103	T5H A							47
3067	Glovelier		JU 90	T5H 532							5
3068	Tavannes		BEJ 85	T4H 20							17
3069	Gams		SG 79	T5H 430							5
3070	Altstätten		SG 147	T4H A							30
3071	Rorschach		SG 241	T5H B							22
3072	Bottighofen		TG 244	T5H 272							35
3073	Kreuzlingen		TG 236	T5H 271							23
3074	Frauenfeld		TG 3	T4H B							19
3075	Schaffhausen		SH 16	T4H 19							38
3076	Kaiserstuhl		AG 2	T5H A							23
3077	Zollikofen		BEN 4	T3H 73							15
3078	Lyss		BEN 37	T4H F							18
3079	Sursee		LU 108	T3H 129							41
3080	St. Gallen Kreuzbleiche		SG 271	T5H D							20
3081	Küssnacht		SZ 7	T3H 160							50
3082	Bennau		SZ 203	T4H A							25
3083	Rodi		TI 60	H3H 854							290
3084	Lavorgo		TI 85	T3H 197							-12
3085.1	Burglauenen		BEO 652	T4V E							0
3086	Blitzingen		VSD 84	T4H 107							0
3087	Brig Bahnhof		VSD 319	T4H Q							30
3088	Brig Stockalper		VSD 136	T3H 99							31
3089	Herzogenbuchsee		BEN 329	T4H 25							72
3090	Murgenthal		AG 444a	T4H E							31
3091	Birmensdorf	10911680	ZH 1324	T5V 168					S	40	-14
3092	Merenschwand		AG 298	T4H 28							35
3093	Gisikon		LU 158a	T4H B							27
3094	Frutigen		BEO 420	T5V A							0
3095	Kandergrund		BEO 429	T5H 329							15
3096	Adelboden		BEO 1202	D1H 4000							44
3097	Lenk		BEO 1203	D1H 3927							16
3098	Zweisimmen		BEO 538	T4V 62							80
3099	Weissenburg		BEO 509	T4H A							28
3100	Lütschental		BEO 644	T4H C							41
3101	Eismeer		BEO 1204	T0V GRAV							0
3101.1	Eismeer LFP	12293360	BEO 1205	T0V 336							0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
3102	Estavayer		FR 277	T3H 186							47
3103	Echallens		VDO 129	T3H 184							45
3104	Cossonay		VDO 262	T4H B							45
3105	Kerzers		FR 334	D1H 39							30
3106	Ins		BEN 125	T4H 7							3
3107	St.Aubin		NE 6	T5H C							16
3108	Vuiteboeuf		VDO 406	T5H A							16
3109	Genève rade		GE 2	H5V R							0
3110	CERN refETHZ2017		GE 1022	D2V ETHZ							0
3111	Sissach		BL 43	T3H 175							39
3112	Hornussen		AG 178	T4H B							43
3113	Brugg		AG 554	T3H 147							39
3114	Hauenstein		SO 116	T5H 301							55
3115	Liestal		BL 29	T4H 34							50
3116	Boudevilliers		NE 87	T4H 9							20
3117	La Chaux-de-Fonds Niv		NE 115	T4V 28							21
3118	La Chaux-du-Milieu		NE 150	T5H 482							28
3119	Fleurier		NE 187	T4H 54							15
3120	Orbe		VDO 226	T4H 887							22
3121	Pfyn		TG 143	T4H A							20
3122	Wil		SG 308	T1V 326							0
3123	Winterthur		ZH 333	T1V 126							0
3124	Grüsch		GR2 10	T4H 7							100
3125	Schiers	11765090	GR2 353	T5V 509					S	50	-16
3126	Küblis		GR2 31	T5H 645							36
3127	Flüelapass		GR3 270	T4V 11							0
3128	Susch		GR3 248	H2V 333							0
3129	Sta. Maria		GR3 369	T4H 871							106
3130	Scuol		GR3 305	T4V 37							33
3131	Poschiavo		GR3 439	H3H 52							254
3132	Brusio		GR3 453a	T4H F							29
3134	S-chanf		GR3 215	H2V 344							47
3135	Samedan		GR3 172	T4H Q							30
3136	Silvaplana		GR3 134	T4V 1							7
3137	Maloja Niv		GR3 118	T4H B							55
3138	Casaccia		GR3 110	T4V 18							0
3139	Vicosoprano		GR3 95	T4H 29							18
3140	Castasegna		GR3 78	T4H B							50
3141	Bivio		GR2 266	T5H 652							0
3142	Mulegns		GR2 246	T4V A							53
3143	Savognin		GR2 226	T4H 18							28
3144	Tiefencastel		GR2 207	T4H D							16
3145	Klosters		GR2 49	T4H 28							81
3146	Sumiswald		BES 1171	D1H 1430							18
3147	Bätterkinden		BEN 1301	T4H A							34
3148	Schwarzenburg		BES 1172	D1H 972							49
3149	Zollhaus		FR 1018	D1V 50B							0
3150	Giffers		FR 1019	D1H 25							62
3151	Henniez		VDE 97	T4H B							12
3152	Moudon Niv		VDE 73	T4H B							44
3153	Rue		FR 1020	T4V A							6
3154	Lausanne niv		VDE 1	T1V 23							0



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
3155	Morges		VDO 27	T5H B							16
3156	Rolle		VDO 59	H2V 1318							118
3157	Les Allévays		VDO 1027	T0V 26.1							0
3158	La Cure		VDO 324	T4H U							22
3159	Le Brassus		VDO 334	T5H 444							27
3160	Le Pont		VDO 359	T5H 448							10
3161	Lignerolle		VDO 385	D1H 144							65
3162	Jongny		VDE 288	T5H 359							17
3163	Turbenthal		ZH 1325	T0V GRAV							0
3164	Bauma		ZH 365	H3H 874							183
3165	Wetzikon		ZH 382	H3H 268							189
3166	Rüti ZH		ZH 396	H3H 271							195
3167	Uznach		SG 439a	T4H B							34
3168	Grosshöchstetten		BES 272	T4V B							0
3169	Langnau		BES 313	T4H A							37
3170	Wiggen		LU 277	T5H C							16
3171	Schüpfheim	11693570	LU 361	T5V 357					S	50	-14
3172	Wolhusen		LU 212	H3H 968							169
3173	Willisau		LU 1283	D1H 165							24
3174	Engelberg		OW 97	T4H 50							20
3175	Grafenort		OW 86	T4H 29							18
3176	Sarnen		OW 25	H3H 717							177
3177	Lungern		OW 52	T4V T							30
3178	Brünigen		BEO 182	T4V J							0
3179	Huttwil		BEN 1294	D1H 1500							32
3180	Ramiswil		SO 1093	H3H 43							8
3180.1	Ramiswil Kapelle		SO 1094	T0V GRAV							0
3181	Solothurn		SO 40	H2H 475							30
3181.1	Solothurn Grav		SO 40g	T0V GRAV							0
3182	Schwarzenegg		BES 1170	D1H 586							34
3183	Thun niv		BEO 4	T4H B							51
3184	Brienz Niv		BEO 152	T5H B							31
3185	Innertkirchen		BEO 220	T4V 24							0
3186	Guttannen		BEO 254	T4H E							25
3187	Brig Kollegiumskirche		VSD 138a	T4H W							21
3188	Goppenstein		VSD 211a	T3H 180							27
3189	Fafleralp	12686160	VSD 1221	T5V 616							0
3190	Rochefort		NE 250	T4H B							27
3191	Moutier		BEJ 127	H3H 109							275
3192	Boncourt		JU 119	T4V 46							86
3193	Saignelégier		JU 62	T5H 528							52
3194	St.Imier		BEJ 44	T4H 6							42
3195	Gadmen		BEO 343	T4V A							0
3196	Sustenpass	12112150	BEO 610	T5V 215							0
3197	Färnigen		UR 196	T4H C							41
3198	Husen		UR 189	T4H A							30
3199	Andermatt		UR 97	T1V 97							122
3200	Altdorf		UR 19	T5H 564							33
3201	Sanetschpass	12861000	VSF 1002	T5V 100							0
3201.1	Sanetschsee		VSF 1003	T5V 3							0
3202	Gsteig		BEO 563	T4H A							21
3203	St.Gingolph		VSF 339	T4H 35							30



Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
3204	Aigle		VDE 353	T1V 75							-24
3205	Sembracher		VSF 212	T3H 97							30
3206	Verbier	13257430	VSF 1004	T5V 743							0
3207	Orsières		VSF 233	T3V 96							0
3208	Bourg St.Pierre Niv		VSF 255	T4V A							0
3209	Grand St.Bernard		VSF 266	T4V A							0
3210	Col de la Forclaz		VSF 281	T4V 26							0
3211	Le Châtelard		VSF 294	T4V 40							0
3212	Grimentz	13074660	VSF 1005	T5V 466							0
3213	Noës		VSF 15	T4H B							15
3214	Aigle-Le Sépey		VDE 389	T0V B3							0
3215	Boniswil		AG 417	H3H 227							134
3216	Schwarzenbach	11101380	LU 374	T5V 138					S	50	-11
3217	Cham		ZG 65	T4H 37							46
3218	Neuägeri		ZG 24	H3H 1017							212
3219	Sattel		SZ 79	T4H 13							107
3220	Muotathal		SZ 1405	D1H 52							30
3221	Urigen		UR 239	T0V A							0
3222	Klausenpass Niv		UR 265	T0V A							0
3223	Wegabzweigung Klausenpass		UR 272	T0V B							0
3224	Linthal		GL 117	H3H 429							48
3225	Elm		GL 143	T4H G							46
3226	Feusisberg		SZ 178	T4H K							22
3227	Nätschenkehr		UR 136	T4V D							0
3228	Sogn Gions		GR1 488	D1V 202							0
3229	Lukmanier Niv		TI 607	D1V 45C							0
3230	Horgen		ZH 73	T5H 234							24
3231	Dietikon		ZH 158	T4H 67							27
3232	Pont de Tronchets		VSF 260	T4V K							0
3235	Hallau		SH 71	T4V 37							0
3236	Stein a.Rhein		SH 80	T1V 170							0
3237	Berlingen		TG 205	H2H 309							55
3238	Uttwil		TG 262	T5H 276							70
3239	Ardez		GR3 287	T4H A							30

Hier werden noch einige Punkte aufgelistet, welche als weitere Kandidaten für Punkte 3. Ordnung vorgesehen sind, aber noch nicht beobachtet wurden. Sie sollen als weitere Verknüpfungspunkte zu alten Netzen dienen oder als Verdichtungspunkte in durch das LSN noch schlecht abgedeckten Regionen.

Nr LSN	Name	Nr. LFP	Nr. HFP	Bez. HFP	N	P	Z	S	L	Ø	HP
	St. Triphon Niv		VDE 367	T4H 41							50
	Broglio		TI NC 110a	D1V 110a							25
	Chiasso		ITA 7	D3V 5A							0
	San Gottardo Niv		TI 12	T4V 15							0
	Bellinzona		TI 176	T4V B							0
	Brione		TI NC 126	D1H 126							38
	Spitzkehre Surpalits		GR1 8	T4V 979							0
	Tschamut		GR1 16	T3V 199							0
	Sörenberg	11892240	LU								0
	Murg		SG 489	T4H 85							35
	Grellingen		BL 121	T5H 542							30



A2 Koordinaten der Punkte in LV95/LN02 und ETRS89

Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
0001	Zimmerwald Ref	2602020.06	1191764.00	894.782	7.465133	46.876995
0001.0	Zimmerwald Abs	2602021.56	1191765.50	894.677	7.465153	46.877009
0001.1	Zimmerwald 800	2602030.77	1191775.06	897.915	7.465274	46.877095
0001.2	Zimmerwald 8002	2602027.84	1191766.66	897.775	7.465235	46.877019
0002.0	Zürich Abs	2680611.00	1251460.00	519.501	8.506683	47.409021
0002.1	Zürich Base	2680861.00	1251300.00	530.000	8.509966	47.407551
0003.0	Lausanne Abs	2533181.56	1152617.48	392.421	6.567854	46.521512
0003.1	Lausanne Exz	2533173.52	1152626.74	395.658	6.567748	46.521594
0003.2	Lausanne B2	2533747.52	1152721.27	393.180	6.575214	46.522502
0003.3	Lausanne B3	2533748.87	1152722.29	393.168	6.575232	46.522511
0003.4	Lausanne B1	2533740.35	1152716.55	393.115	6.575121	46.522459
0004.0	Wabern WAN A	2601990.05	1196966.01	546.507	7.464761	46.923789
0004.1	Wabern WAN B	2601989.05	1196964.01	546.503	7.464748	46.923771
0004.3	Wabern Exz	2601928.91	1197012.50	550.402	7.463959	46.924207
0004.4	Wabern 1997	2601871.00	1197065.00	551.000	7.463199	46.924680
0004.5	Wabern WAN C	2601987.00	1196966.00	546.500	7.464721	46.923789
0004.6	Wabern WAN D	2601986.00	1196964.00	546.500	7.464708	46.923771
0005.0	Basel Abs	2611567.99	1267312.77	266.401	7.592313	47.556429
0005.1	Basel Exz	2611571.25	1267292.66	270.287	7.592356	47.556248
0006	Brig Ref	2642725.82	1129415.72	713.488	7.993326	46.314788
0006.0	Brig Abs	2642725.00	1129417.00	713.176	7.993315	46.314799
0006.1	Brig Exz	2642700.39	1129419.91	712.441	7.992996	46.314827
0007.0	Andermatt Abs	2688148.96	1166500.23	1431.936	8.590028	46.643927
0007.1	Andermatt Exz	2688173.97	1166488.07	1430.864	8.590352	46.643815
0008	M.Ceneri Ref	2713465.02	1110079.05	704.094	8.906844	46.132652
0008.0	M.Ceneri Abs	2713458.48	1110078.58	703.699	8.906759	46.132649
0008.1	M.Ceneri Exz	2713465.48	1110079.41	703.683	8.906850	46.132655
0009	Chur Ref	2760011.90	1190708.92	629.978	9.536803	46.848265
0009.0	Chur Abs	2760009.47	1190710.05	629.667	9.536772	46.848276
0009.2	Chur Exz 2	2759982.46	1190785.06	633.339	9.536444	46.848957
0010.0	Zernez Abs	2803110.18	1175424.04	1470.409	10.094762	46.699087
0010.2	Zernez Exz2	2803148.22	1175438.40	1473.004	10.095266	46.699205
0012.0	Interlaken_alt Abs	2632430.20	1170519.70	566.590	7.862546	46.685112
0012.1	Interlaken_alt Exz	2632442.21	1170509.70	569.882	7.862702	46.685022
0012.2	Interlaken_neu Abs	2632166.15	1169893.00	570.019	7.859051	46.679488
0012.3	Interlaken_neu Exz	2632149.33	1169929.00	570.171	7.858834	46.679812
0013.2	Jungfrauoch2013	2641804.57	1155231.61	3456.163	7.983693	46.547071
0013.3	Jungfrauoch Exz E	2641798.27	1155249.79	3456.135	7.983612	46.547234
0013.4	Jungfrauoch VP1	2641798.50	1155231.60	3456.150	7.983614	46.547071
0013.6	Jungfrauoch VP3	2641804.50	1155226.00	3456.150	7.983691	46.547020
0013.7	Jungfrauoch LV95	2641904.99	1155278.12	3578.310	7.985006	46.547483
0013.8	Jungfrauoch GP	2641901.87	1155278.36	3578.343	7.984966	46.547485
0014.0	Bäzberg Abs	2687575.43	1166664.64	1115.435	8.582569	46.645481
0014.1	Bäzberg Exz	2687575.43	1166664.64	1115.435	8.582569	46.645481
0015.0	Guspisbach Abs	2686620.33	1159579.61	1166.359	8.568762	46.581879
0015.1	Guspisbach exz	2686620.33	1159579.61	1166.359	8.568762	46.581879
0016.0	Mont Terri Niche HE	2579358.71	1247642.96	514.811	7.165298	47.379294
0016.1	Mont Terri Südportal	2579692.74	1246477.04	517.693	7.169774	47.368817
0017.1	CERN PREV	2493809.24	1124009.07	461.960	6.061389	46.259105



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
0017.2	CERN Pt4	2491931.92	1129057.68	584.950	6.035873	46.304213
0018.0	Alpiglen	2643161.02	1161132.63	1615.966	8.001929	46.600066
0018.1	Alpiglen alt	2643164.00	1161137.00	1616.000	8.001969	46.600105
0019.0	Grindelwald	2646577.56	1162686.63	1011.065	8.046674	46.613815
0019.1	Grindelwald Exz	2646575.54	1162686.63	1011.043	8.046647	46.613815
0019.2	Grindelwald alt	2646506.01	1163918.04	1057.778	8.045864	46.624897
0019.3	Grindelwald Bhf	2644785.00	1163652.00	943.310	8.023368	46.622621
0019.4	Grindelwald Bhf niv	2644778.65	1163646.49	943.075	8.023284	46.622572
0020.0	Kleine Scheidegg abs	2639988.99	1159560.88	2063.289	7.960397	46.586125
0020.1	Kleine Scheidegg alt	2640094.27	1159463.22	2064.974	7.961762	46.585240
0020.2	Kleine Scheidegg S1	2640099.55	1159415.15	2064.511	7.961826	46.584807
0021.0	Eigergletscher abs	2641099.34	1158302.60	2320.702	7.974771	46.574739
0022.0	Eigerwand abs	2643288.85	1159046.73	2864.955	8.003402	46.581294
0022.1	Eigerwand alt	2643348.00	1159092.00	2867.000	8.004178	46.581698
0022.2	Eigerwand LFP G	2643305.82	1159064.11	2864.920	8.003625	46.581450
0030.0	Freiburg Abs3	2628801.19	1315676.68	253.548	7.824424	47.990829
0031.1	Wangen 1	2779715.67	1284741.33	571.294	9.832640	47.688615
0031.5	Wangen 5	2779660.00	1284735.00	570.489	9.831896	47.688573
0033.0	Tisis Abs	2761555.94	1232899.10	458.023	9.572081	47.227253
0033.1	Tisis Exz	2761547.54	1232892.20	458.044	9.571968	47.227193
0034.0	Koblach Abs	2763656.61	1244918.68	456.007	9.604189	47.334805
0034.1	Koblach Exz	2763632.71	1244905.18	456.067	9.603868	47.334690
0035.0	Pfänder abs	2776789.80	1265475.31	1010.520	9.786010	47.516220
0035.1	Pfänder Exz	2776793.51	1265475.62	1010.481	9.786059	47.516221
0043.0	Chaux-Neuve	2500446.82	1169997.92	1008.920	6.137555	46.673762
0044.0	Echenevex	2492443.53	1129820.03	570.545	6.042337	46.311152
0045.0	Corbonod-Gignez	2474338.78	1091264.05	354.120	5.817715	45.961248
0048.0	Chamonix-Montroc	2560946.01	1093974.13	1364.671	6.934593	45.996193
0051.0	Beaumont (Piton)	2499499.62	1105647.42	1374.990	6.139127	46.094829
0053.0	Courtefontaine	2560168.41	1241952.06	750.817	6.911697	47.327225
0055.0	Grande-Riviere	2481489.78	1153739.63	894.606	5.894048	46.524437
0056.0	Oltingue	2597582.30	1260354.58	399.467	7.406539	47.493944
0057.1	Vacheresse a	2541473.94	1130410.39	871.807	6.678723	46.322533
0058.0	Vers	2492161.16	1104634.39	750.565	6.044489	46.084583
1001	Versoix	2501886.42	1126418.91	386.848	6.165620	46.282008
1002	Payerne Ref	2561823.33	1185652.22	458.064	6.938351	46.820921
1002.1	Payerne	2561822.80	1185652.10	458.060	6.938344	46.820920
1003	Monthey	2562092.45	1122468.31	421.867	6.947079	46.252573
1004	Porrentruy Ref	2572870.36	1251778.67	425.567	7.079130	47.416254
1004.1	Porrentruy	2572870.00	1251785.50	424.620	7.079124	47.416316
1005	Biel/Bienne Ref	2585074.13	1221067.25	450.039	7.241867	47.140413
1005.1	Biel/Bienne	2585074.30	1221067.05	449.790	7.241869	47.140411
1006	Pfynwald	2613101.17	1128510.88	603.648	7.608705	46.307877
1007	Thun	2612762.42	1178649.89	562.381	7.605687	46.758911
1010	Menzberg	2641254.80	1210053.28	1109.820	7.981465	47.040233
1011	Sibingen	2679565.70	1285250.03	515.166	8.498884	47.713017
1012	Altdorf Ref	2691876.99	1193021.82	458.559	8.644037	46.881969
1012.1	Altdorf Niv	2691877.40	1193021.80	458.610	8.644042	46.881969
1013	Galgenen	2708817.42	1226696.82	426.497	8.874329	47.182270
1014	Acquarossa	2715473.77	1145931.59	528.311	8.941717	46.454768
1015	Mendrisio	2719990.44	1080708.73	357.194	8.983774	45.867374
1016	Weinfelden Ref	2725868.86	1269949.90	442.371	9.111403	47.568184



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
1016.1	Weinfelden	2725868.35	1269949.90	442.210	9.111397	47.568184
1018	Maloja	2773457.26	1140975.42	1810.246	9.694266	46.397702
1019	Aarburg	2634807.71	1241170.72	398.389	7.899035	47.320491
2001	Bossy MN95	2498496.53	1126787.00	448.605	6.121564	46.284815
2002	La Givrine	2497312.65	1145626.14	1207.434	6.102035	46.454081
2003	Le Lieu	2510635.74	1166084.32	1052.957	6.271458	46.640006
2004	Essertines	2514537.74	1148549.46	765.010	6.325668	46.482797
2005	Col des Etroits	2528021.92	1187010.30	1166.038	6.495221	46.830334
2006	La Sarraz	2530238.09	1167827.59	535.820	6.527191	46.658025
2007	Echandens	2530534.92	1155303.40	450.253	6.532961	46.545402
2008	Travers	2541636.49	1199286.36	786.814	6.672079	46.942091
2009	Savigny	2547173.35	1153528.56	719.270	6.750082	46.530960
2010	Moudon	2552568.96	1168032.06	733.500	6.818910	46.661828
2011	La Chaux-de-Fonds	2555342.27	1214665.36	1193.948	6.850567	47.081487
2012	Forel MN95	2557520.15	1191462.53	468.550	6.881420	46.872924
2013	Chailly	2558235.14	1144936.62	511.120	6.895037	46.454456
2014	Fahy	2563017.02	1251105.54	584.672	6.948622	47.409719
2015	St. Triphon	2564485.02	1127021.11	448.337	6.977756	46.293659
2016	Chasseral	2571097.06	1220268.56	1597.668	7.057666	47.132764
2017	La Tour-de-Trême	2571572.46	1161970.57	748.470	7.067578	46.608385
2018	Martigny	2571424.58	1106013.95	574.262	7.069099	46.105021
2018.1	Martigny RAB	2571394.90	1105986.60	541.597	7.068717	46.104774
2019	Vully	2573815.77	1201435.73	649.600	7.094593	46.963478
2020	Fribourg MN95	2577712.12	1185115.72	681.950	7.146588	46.816819
2021	Les Rangiers	2582653.76	1247512.26	838.495	7.208935	47.378213
2022	Reconvilier	2582454.79	1231582.45	819.220	7.206926	47.234929
2023	Bourg St.Pierre	2582234.10	1089695.81	1629.503	7.209510	45.958606
2024	Saanen	2586918.70	1149063.33	1114.626	7.268257	46.492756
2024.1	Saanen neu	2586605.21	1149020.06	1070.632	7.264176	46.492361
2025	Seedorf	2591219.96	1209895.25	569.330	7.323104	47.040032
2026	Guggisberg	2593547.96	1180627.47	1118.750	7.354155	46.776789
2027	Sion	2594500.10	1120353.07	593.011	7.367349	46.234596
2028	Metzerlen	2601547.64	1257600.02	491.750	7.459151	47.469173
2029	Ringgenberg	2635160.58	1172529.28	608.602	7.898389	46.703051
2030	Les Haudères	2605409.26	1103353.26	1454.446	7.508572	46.081675
2031	Riedholz	2609524.76	1231501.35	514.006	7.564410	47.234367
2032	Engstligenalp	2609713.57	1144184.61	1964.940	7.565058	46.448929
2033	Chrischona	2617306.92	1268507.87	456.064	7.668606	47.567051
2034	Vogelberg	2618261.81	1246300.59	1197.610	7.680389	47.367295
2034.1	Vogelberg HP	2618052.44	1246257.16	1167.866	7.677616	47.366910
2035	Lueg	2619544.66	1213708.37	839.515	7.695961	47.074104
2036	Jeizinen	2621906.57	1130595.83	1525.192	7.723102	46.326404
2037	Signau	2623787.73	1197990.51	706.320	7.751005	46.932584
2038	Zermatt	2623706.01	1096020.08	1687.567	7.744720	46.015317
2040	Sissacherfluh	2628621.78	1258947.80	700.810	7.818350	47.480676
2041	Langenthal	2629477.66	1228055.72	565.370	7.827676	47.202788
2043	Wartburg	2636308.03	1242602.11	653.200	7.918995	47.333284
2045	Saas Fee	2638236.83	1106801.06	1813.839	7.933201	46.111630
2046	Simplon	2645777.38	1122290.56	2009.242	8.032242	46.250494
2047	Laufenburg LV95	2646839.99	1268057.90	359.627	8.061001	47.561564
2048	Knutwil	2647382.33	1228185.31	578.435	8.063988	47.202914
2049	Brienz	2648358.33	1177994.06	648.947	8.071530	46.751382



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
2050	Fieschertal	2654264.46	1141850.91	1157.580	8.144569	46.425813
2051	Lenzburg	2656314.03	1248745.94	504.470	8.184442	47.387137
2052	Alpnach	2666857.43	1200560.92	828.450	8.316926	46.952767
2053	Grimsel	2669035.55	1157192.17	2169.961	8.339002	46.562451
2054	Crodo d'Ossola	2668672.08	1122627.03	550.100	8.329147	46.251573
2055	Lägern	2672526.10	1259423.91	852.940	8.400867	47.481584
2056	Sins	2672345.44	1227806.41	427.727	8.393368	47.197246
2058	Hönggerberg	2679886.20	1251326.32	528.315	8.497057	47.407907
2059	Oberarth	2683113.95	1212157.70	455.667	8.532583	47.055236
2060	Buchberg	2684033.55	1270183.45	525.037	8.555555	47.576973
2061	San Gottardo alt	2686419.13	1156225.71	2108.693	8.565509	46.551738
2061.1	San Gottardo neu	2686380.84	1156199.75	2101.511	8.565005	46.551509
2062	Bignasco	2690329.53	1132668.80	588.240	8.611899	46.339336
2063	Altdorf LV95	2691443.14	1191517.95	457.486	8.638044	46.868503
2064	Brütten	2693038.80	1258953.11	639.531	8.672882	47.474768
2065	Pfannenstiel	2693607.01	1238359.43	798.730	8.676111	47.289486
2066	Oberalp	2694279.93	1168353.29	2042.769	8.670477	46.659757
2067	Einsiedeln	2700453.23	1220929.77	931.806	8.762713	47.131728
2068	Dalpe	2702425.51	1148633.88	1244.420	8.772506	46.481195
2069	Stammheim	2703451.19	1276263.71	508.611	8.815015	47.628875
2070	Ascona	2703112.62	1112936.82	218.740	8.773543	46.160019
2071.1	Schauenberg neu	2707624.60	1257572.67	888.840	8.866005	47.460129
2072	Klausenpass	2707986.33	1191681.50	1955.144	8.855028	46.867494
2073	Bachtel	2709468.74	1237273.91	729.320	8.885494	47.277283
2074	Biasca alt	2717279.87	1134682.30	289.263	8.962377	46.353279
2074.1	Biasca neu	2718379.59	1134684.81	379.187	8.976662	46.353109
2076	Sonvico	2720541.32	1102726.96	904.060	8.996496	46.065301
2077	Generoso EUREF	2722649.39	1087786.36	1692.840	9.019842	45.930551
2077.1	Generoso LV95	2722759.06	1087648.19	1636.600	9.021219	45.929288
2077.2	Generoso 23F	2722656.39	1087867.76	1701.520	9.019953	45.931282
2078	Glarus	2722860.46	1212025.05	520.814	9.055570	47.047867
2079	Brigels	2725305.41	1180977.57	1363.320	9.079195	46.768191
2080	Nollen	2726834.43	1261519.34	734.660	9.121828	47.492193
2081	Oberhelfenschwil	2726396.26	1245733.23	853.080	9.111548	47.350328
2082	Zervreilasee	2728289.77	1159144.21	1984.080	9.112159	46.571266
2083	Dettighofen	2733095.76	1275945.10	501.600	9.209214	47.620663
2084	Mesocco	2737917.51	1138968.49	804.218	9.231694	46.387903
2085	Schwägalp	2741069.08	1236693.34	1252.880	9.302839	47.266065
2086	Bonaduz	2748956.34	1186207.65	662.822	9.390430	46.810355
2087	Colico	2750344.32	1112386.10	242.000	9.384619	46.146182
2088	Goldach	2751581.76	1259783.24	500.784	9.449524	47.471343
2089	Sargans	2752006.63	1212822.53	514.030	9.439273	47.048994
2090	Andeer	2752235.08	1162014.53	1087.626	9.425347	46.592054
2091	Filisur	2771382.94	1171945.14	1144.525	9.678804	46.676713
2092	Pfänder LV95	2776668.59	1265372.25	1042.624	9.784360	47.515326
2093	Davos	2783747.57	1187595.55	1561.163	9.846604	46.814139
2094	Berninapass	2799039.15	1143214.90	2328.832	10.027667	46.410732
2095	Zernez	2803567.47	1175382.78	1561.235	10.100720	46.698577
2096	Ramosch	2825910.38	1192173.56	1529.980	10.400926	46.842316
2097	Santa Maria	2829042.35	1165998.19	1351.495	10.428878	46.605957
2098	St. Margrethen Niv	2765293.80	1257845.69	419.437	9.630620	47.450619
2098.1	St. Margrethen	2765292.50	1257844.20	419.050	9.630602	47.450606



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
2099	Vinadi	2832028.42	1201586.96	1087.384	10.485863	46.924823
2100.1	L'Isle	2521308.77	1163402.22	662.798	6.411300	46.617226
2100.2	Mont-la-Ville	2521158.67	1166587.78	834.169	6.408793	46.645861
2100.3	Mont-la-Ville B	2520741.62	1167711.61	994.786	6.403152	46.655920
2100.4	Mollendruz	2518014.30	1166993.11	1174.489	6.367654	46.649128
2101	Ofenpass	2818420.20	1169322.98	2158.722	10.291905	46.639403
3001	Spiez	2618230.47	1171088.04	626.895	7.676960	46.690763
3001.3	Spiez exz 3	2618228.00	1171086.00	628.000	7.676927	46.690744
3001.4	Spiez exz 4	2618228.00	1171086.00	628.000	7.676927	46.690744
3002	Gampel	2623315.67	1129422.33	636.282	7.741340	46.315800
3003	Kandersteg	2618112.05	1149289.16	1174.036	7.674557	46.494674
3004	Wichtrach	2610720.05	1188264.93	551.288	7.579178	46.845438
3005	Lachen	2707022.08	1227798.46	408.450	8.850909	47.192470
3006	Sargans Niv.	2752036.69	1212789.18	507.125	9.439657	47.048687
3008	Chur Niv	2759737.02	1190668.44	603.729	9.533186	46.847967
3009	Reichenau	2750351.51	1187801.46	600.049	9.409228	46.824374
3010	Trun	2718450.93	1178042.34	859.881	8.988717	46.743047
3011	Disentis	2708283.45	1173627.16	1129.978	8.854650	46.705066
3012	Sedrun	2702254.21	1170692.71	1397.823	8.775169	46.679625
3013	Thusis	2752958.77	1173393.21	731.229	9.438572	46.694213
3014	Splügen	2744583.44	1157513.65	1464.294	9.324119	46.553277
3015	Hinterrhein	2734955.68	1154793.94	1619.878	9.197814	46.530830
3016	San Bernardino	2734667.62	1147309.97	1614.196	9.191880	46.463582
3017	Roveredo	2730627.29	1122240.80	300.142	9.132250	46.238921
3018	Castione	2723692.43	1120730.40	239.739	9.041964	46.226648
3019	Soazza	2737287.91	1136677.89	619.920	9.222834	46.367432
3020	Luzern	2666479.51	1211984.31	445.031	8.313634	47.055553
3021	Birrfeld	2660120.43	1255148.75	395.477	8.235711	47.444386
3022	Neuchâtel CHYN	2562910.84	1205555.66	485.305	6.950976	47.000015
3023	Yverdon	2539108.93	1181118.87	435.126	6.641313	46.778450
3024	Oulens	2534130.27	1166189.51	589.288	6.578274	46.643687
3025	Vevey	2554527.77	1145820.31	406.183	6.846697	46.462163
3026	Masans	2759741.96	1193149.10	578.885	9.534120	46.870272
3027	Illanz	2734873.51	1181802.73	704.012	9.204667	46.773744
3028	Bern	2600909.51	1199574.47	536.994	7.450579	46.947255
3029	La Neuveville	2573754.66	1212596.53	439.122	7.093142	47.063867
3030	Neuchâtel Obs.	2563071.59	1205569.10	485.835	6.953089	47.000145
3031	Avenches	2569637.53	1192166.53	479.694	7.040315	46.879922
3032	Fribourg Cath.	2578934.77	1183935.23	588.241	7.162664	46.806240
3033	Flamatt	2590101.73	1192675.84	542.385	7.308768	46.885126
3034	Schüpfen	2595266.32	1209551.76	529.241	7.376349	47.036985
3036	Aarau	2645835.37	1248942.13	393.966	8.045690	47.389713
3037	Baden	2665478.37	1258187.43	383.814	8.307187	47.471203
3038	Reiden	2640389.09	1232654.81	458.746	7.972094	47.243578
3039	Nottwil	2653118.31	1220351.00	552.575	8.138767	47.132013
3040	Lugano	2716959.02	1095923.12	305.840	8.948519	46.004739
3042	Osogna	2719255.05	1130117.59	275.818	8.986862	46.311877
3043	Wassen LV95	2688988.24	1173332.58	876.611	8.602312	46.705270
3044	Cadenazzo	2716918.29	1111956.91	243.375	8.951985	46.148951
3045	Münster VS	2663352.60	1148805.14	1389.874	8.263740	46.487571
3046	Gletsch	2670859.73	1157274.24	1758.878	8.362803	46.562998
3047	Sierre	2607525.00	1126927.51	538.097	7.536298	46.293718



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
3048	Sion Niv	2593852.23	1120248.73	521.257	7.358952	46.233651
3049	Martigny Niv	2571796.72	1105534.28	472.568	7.073941	46.100722
3050	Rodont	2685760.10	1158081.78	1981.123	8.557262	46.568517
3051	Airolo Bahnhof	2689901.35	1153628.85	1148.509	8.610404	46.527921
3052	Airolo Kirche	2689768.57	1153771.59	1171.241	8.608701	46.529223
3053	Bignasco niv	2690120.00	1132855.00	447.139	8.609214	46.341039
3054	Simplon Hospiz	2645546.16	1121856.64	1997.442	8.029201	46.246606
3055	Lalden	2636087.40	1127502.69	650.175	7.906998	46.297968
3056	Zermatt Kirche	2623823.79	1096480.78	1616.473	7.746264	46.019457
3057	Herbriggen	2627293.56	1109253.26	1261.952	7.791806	46.134220
3058	St.Niklaus	2628123.97	1114045.50	1115.819	7.802838	46.177294
3059	Bulle	2570879.75	1162642.38	761.236	7.058494	46.614399
3060	Farvagny-le-Grand	2571518.49	1174597.22	699.364	7.066088	46.721965
3061	Oensingen	2621795.02	1237906.16	464.803	7.726757	47.291685
3062	Olten	2635041.20	1244504.42	401.193	7.902383	47.350462
3063	Kaiseraugst	2621506.76	1265640.50	267.546	7.724278	47.541139
3064	Basel Pauluskirche	2610490.55	1266802.31	280.282	7.577987	47.551856
3065	Laufen	2604676.75	1252244.21	350.527	7.500601	47.420988
3066	Delémont	2592757.18	1245965.14	431.841	7.342744	47.364488
3067	Glovelier	2581757.86	1242517.65	520.700	7.197276	47.333266
3068	Tavannes	2581842.61	1229937.02	756.168	7.198908	47.220113
3069	Gams	2751656.83	1230021.67	501.156	9.440446	47.203727
3070	Altstätten	2758805.87	1249675.19	461.339	9.541720	47.378758
3071	Rorschach	2754737.92	1260191.39	424.977	9.491517	47.474277
3072	Bottighofen	2733137.37	1278023.69	415.741	9.210392	47.639343
3073	Kreuzlingen	2730332.58	1278547.41	419.502	9.173233	47.644616
3074	Frauenfeld	2709876.32	1268254.92	416.790	8.898498	47.555814
3075	Schaffhausen	2690347.46	1283754.09	435.000	8.642231	47.698167
3076	Kaiserstuhl	2673732.74	1269001.51	368.582	8.418461	47.567582
3077	Zollikofen	2601834.53	1205635.66	560.227	7.462753	47.001774
3078	Lyss	2590028.65	1213286.11	446.665	7.307353	47.070516
3079	Sursee	2650602.78	1224875.18	499.745	8.106119	47.172902
3080	St. Gallen Kreuzbleiche	2745375.34	1253954.81	677.345	9.365324	47.420339
3081	Küssnacht	2676206.75	1214849.41	459.503	8.442133	47.080276
3082	Bennau	2697937.43	1222777.51	882.717	8.729959	47.148723
3083	Rodi	2699863.81	1149476.35	945.034	8.739333	46.489160
3084	Lavorgo	2707681.74	1144246.20	615.216	8.839922	46.440907
3085.1	Burglauenen	2641119.39	1165061.61	894.626	7.975635	46.635537
3086	Blitzingen	2658684.86	1143833.67	1292.503	8.202322	46.443277
3087	Brig Bahnhof	2642402.02	1129904.08	673.086	7.989167	46.319201
3088	Brig Stockalper	2642534.59	1129470.84	691.501	7.990848	46.315296
3089	Herzogenbuchsee	2620411.18	1226270.32	492.104	7.707936	47.187070
3090	Murgenthal	2629774.83	1235027.58	413.974	7.832058	47.265483
3091	Birmensdorf	2674851.92	1243483.85	590.116	8.429053	47.337967
3092	Merenschwand	2670901.13	1234773.95	394.626	8.375406	47.260068
3093	Gisikon	2672722.73	1219684.76	414.716	8.397037	47.124157
3094	Frutigen	2615641.13	1159671.21	826.276	7.642723	46.588128
3095	Kandergrund	2617198.39	1154959.60	874.597	7.662867	46.545706
3096	Adelboden	2609761.25	1148771.92	1240.446	7.565774	46.490194
3097	Lenk	2600325.28	1145088.13	1064.663	7.442875	46.457126
3098	Zweisimmen	2594883.64	1155633.45	960.934	7.371926	46.551967
3099	Weissenburg	2602856.08	1167465.55	743.253	7.475952	46.658418



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
3100	Lütschental	2639465.99	1165250.88	726.768	7.954060	46.637339
3101	Eismeer	2643800.00	1158000.00	3160.000	8.009971	46.571846
3101.1	Eismeer LFP	2643837.90	1158056.39	3159.700	8.010471	46.572350
3102	Estavayer	2554900.65	1188938.35	456.233	6.847311	46.850046
3103	Echallens	2538261.71	1165912.27	619.775	6.632270	46.641588
3104	Cossonay	2528791.55	1162967.48	563.186	6.509047	46.614156
3105	Kerzers	2581541.45	1202815.79	458.706	7.196045	46.976152
3106	Ins	2574703.59	1206117.45	476.704	7.105996	47.005625
3107	St.Aubin	2549316.38	1194028.81	471.483	6.773529	46.895431
3108	Vuiteboeuf	2532252.48	1184519.75	597.101	6.551036	46.808377
3109	Genève rade	2500920.86	1117810.79	375.049	6.154924	46.204442
3110	CERN refETHZ2017	2493160.54	1120934.80	428.867	6.053682	46.231351
3111	Sissach	2627942.38	1257292.18	373.265	7.809232	47.465815
3112	Hornussen	2647116.26	1261196.77	383.866	8.063946	47.499839
3113	Brugg	2657906.06	1259408.89	352.375	8.206907	47.482898
3114	Hauenstein	2632704.64	1247722.51	680.084	7.871695	47.379526
3115	Liestal	2622267.05	1259411.55	321.067	7.734065	47.485092
3116	Boudevilliers	2558148.87	1208658.39	757.516	6.888080	47.027640
3117	La Chaux-de-Fonds Niv	2554026.09	1217179.95	997.659	6.832980	47.104015
3118	La Chaux-du-Milieu	2543972.96	1207210.03	1078.866	6.701785	47.013564
3119	Fleurier	2534846.88	1194865.60	744.931	6.583544	46.901695
3120	Orbe	2530685.48	1175182.43	479.858	6.531923	46.724228
3121	Pfyn	2713779.58	1272721.47	409.645	8.951491	47.595313
3122	Wil	2721517.14	1258473.66	585.952	9.050453	47.465811
3123	Winterthur	2697394.69	1261921.60	444.085	8.731306	47.500832
3124	Grüsch	2768073.24	1205818.02	639.853	9.648032	46.982133
3125	Schiers	2771507.71	1204936.64	769.809	9.692822	46.973329
3126	Küblis	2778096.29	1198545.61	814.039	9.776865	46.914131
3127	Flüelapass	2791630.08	1180809.11	2387.552	9.946990	46.750901
3128	Susch	2801903.25	1181100.24	1424.718	10.081491	46.750485
3129	Sta. Maria	2828589.70	1165462.28	1385.982	10.422708	46.601295
3130	Scuol	2818654.01	1187046.59	1242.314	10.303408	46.798653
3131	Poschiavo	2801713.85	1133869.81	1016.770	10.058374	46.325914
3132	Brusio	2807109.07	1126557.12	769.607	10.125138	46.258528
3134	S-chanf	2794898.46	1165421.11	1663.366	9.983211	46.611603
3135	Samedan	2786549.24	1156525.23	1724.923	9.870676	46.534001
3136	Silvaplana	2781024.18	1148071.24	1815.905	9.795379	46.459505
3137	Maloja Niv	2773512.93	1141026.21	1808.565	9.695008	46.398144
3138	Casaccia	2771320.60	1140157.75	1458.202	9.666194	46.390898
3139	Vicosoprano	2767996.41	1135629.99	1067.135	9.621356	46.351025
3140	Castasegna	2759891.48	1133472.81	697.062	9.515361	46.333606
3141	Bivio	2769886.31	1148644.71	1770.231	9.650666	46.467579
3142	Mulegns	2767376.61	1154859.14	1483.296	9.620255	46.524092
3143	Savognin	2765426.05	1162942.33	1211.824	9.597743	46.597262
3144	Tiefencastel	2763626.64	1170120.44	851.926	9.576822	46.662252
3145	Klosters	2786251.79	1193927.13	1205.955	9.881983	46.870370
3146	Sumiswald	2623230.51	1208556.79	701.174	7.744227	47.027647
3147	Bätterkinden	2607719.04	1219786.19	485.454	7.540365	47.129016
3148	Schwarzenburg	2592567.30	1184884.48	808.491	7.341245	46.815072
3149	Zollhaus	2590124.86	1173880.05	870.791	7.309481	46.716051
3150	Giffers	2582570.11	1178913.21	765.728	7.210482	46.761171
3151	Henniez	2557636.12	1176896.76	486.297	6.884294	46.741910



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
3152	Moudon Niv	2551053.86	1168783.96	514.083	6.799035	46.668482
3153	Rue	2552778.92	1163356.77	679.594	6.822134	46.619788
3154	Lausanne niv	2538370.70	1152879.78	542.097	6.635439	46.524370
3155	Morges	2527707.86	1151056.27	374.263	6.496771	46.506899
3156	Rolle	2515307.60	1145851.70	387.788	6.336187	46.458629
3157	Les Allévays	2503098.00	1142511.00	652.500	6.177978	46.426924
3158	La Cure	2495108.14	1146862.10	1154.027	6.073066	46.464855
3159	Le Brassus	2505878.14	1159670.76	1036.488	6.210642	46.581664
3160	Le Pont	2515276.42	1168749.86	1022.800	6.331569	46.664587
3161	Lignerolle	2524913.91	1177014.64	762.500	6.456132	46.740082
3162	Jongny	2554173.08	1147574.81	597.490	6.841906	46.477921
3163	Turbenthal	2706270.00	1254751.00	555.000	8.847372	47.434975
3164	Bauma	2708660.06	1247253.18	640.774	8.877226	47.367159
3165	Wetzikon	2702343.51	1241690.16	533.596	8.792345	47.318142
3166	Rüti ZH	2707109.49	1235345.37	483.588	8.853858	47.260327
3167	Uznach	2716609.98	1231866.10	417.829	8.978455	47.227428
3168	Grosshöchstetten	2614954.20	1195080.53	756.923	7.634911	46.906665
3169	Langnau	2626362.40	1199026.09	690.575	7.784874	46.941802
3170	Wiggen	2635904.48	1193954.31	791.243	7.909796	46.895734
3171	Schüpfheim	2644447.80	1200715.81	754.470	8.022563	46.956038
3172	Wolhusen	2648334.53	1212275.03	600.609	8.074853	47.059739
3173	Willisau	2641772.73	1218949.72	561.231	7.989100	47.120222
3174	Engelberg	2674043.61	1185992.71	1014.380	8.408954	46.820970
3175	Grafenort	2671155.29	1191383.49	570.252	8.371947	46.869773
3176	Sarnen	2661505.46	1194054.85	473.919	8.245744	46.894764
3177	Lungern	2655022.77	1181567.00	719.219	8.159176	46.783004
3178	Brünigen	2652675.36	1178038.36	918.394	8.128031	46.751454
3179	Huttwil	2631211.17	1218161.82	648.971	7.849871	47.113715
3180	Ramiswil	2616695.00	1243908.00	640.000	7.659558	47.345816
3180.1	Ramiswil Kapelle	2616494.00	1244902.00	851.000	7.656934	47.354762
3181	Solothurn	2607599.81	1228454.52	429.329	7.538938	47.206987
3181.1	Solothurn Grav	2607593.00	1228442.00	429.329	7.538848	47.206874
3182	Schwarzenegg	2621081.15	1182776.87	922.954	7.714762	46.795824
3183	Thun niv	2614760.53	1178600.73	580.989	7.631839	46.758428
3184	Brienz Niv	2644695.35	1178495.97	583.888	8.023641	46.756152
3185	Innertkirchen	2660590.76	1173116.15	639.442	8.230969	46.706506
3186	Guttannen	2665028.38	1167491.21	1055.172	8.288198	46.655492
3187	Brig Kollegiumskirche	2642614.81	1129477.27	710.774	7.991890	46.315348
3188	Goppenstein	2624280.84	1135419.82	1216.655	7.754183	46.369717
3189	Fafleralp	2632565.94	1142676.85	1769.205	7.862358	46.434647
3190	Rochefort	2552164.68	1203150.03	760.920	6.809943	46.977688
3191	Moutier	2595118.48	1236483.31	531.658	7.374108	47.279227
3192	Boncourt	2567934.95	1260715.72	370.334	7.013088	47.496411
3193	Saignelégier	2566278.16	1233882.45	976.524	6.993129	47.254986
3194	St.Imier	2566641.63	1222557.50	812.850	6.998772	47.153142
3195	Gadmen	2669879.24	1176760.75	1206.358	8.352977	46.738381
3196	Sustenpass	2677252.70	1175792.07	2264.116	8.449282	46.728854
3197	Färnigen	2682820.66	1176505.88	1454.813	8.522244	46.734607
3198	Husen	2686773.28	1174748.75	1177.553	8.573620	46.718299
3199	Andermatt	2688409.24	1166128.60	1431.595	8.593356	46.640550
3200	Altdorf	2692390.40	1192168.12	490.923	8.650598	46.874220
3201	Sanetschpass	2587934.29	1131264.71	2253.740	7.281952	46.332666



Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
3201.1	Sanetschsee	2589150.45	1134430.01	2050.523	7.297671	46.361161
3202	Gsteig	2586830.65	1137076.21	1184.897	7.267453	46.384923
3203	St.Gingolph	2551250.98	1138178.41	386.102	6.804848	46.393191
3204	Aigle	2563986.57	1129815.45	419.838	6.971071	46.318769
3205	Sembrancher	2577710.78	1103029.36	713.726	7.150536	46.078412
3206	Verbier	2582932.84	1105394.60	1483.151	7.217950	46.099841
3207	Orsières	2577327.52	1097771.49	884.926	7.145837	46.031102
3208	Bourg St.Pierre Niv	2582106.56	1088580.97	1636.812	7.207908	45.948574
3209	Grand St.Bernard	2579172.94	1079750.04	2469.233	7.170469	45.869053
3210	Col de la Forclaz	2566186.17	1100834.55	1527.156	7.001730	46.058188
3211	Le Châtelard	2562036.92	1100094.22	1125.527	6.948177	46.051307
3212	Grimentz	2610897.33	1115008.86	1594.292	7.579785	46.186458
3213	Noës	2605141.29	1125491.30	527.353	7.505348	46.280821
3214	Aigle-Le Sépey	2566549.07	1130467.77	663.321	7.004293	46.324770
3215	Boniswil	2656655.40	1240741.06	473.946	8.187950	47.315113
3216	Schwarzenbach	2658858.50	1230931.95	688.111	8.215802	47.226696
3217	Cham	2677235.78	1225766.82	418.279	8.457549	47.178349
3218	Neuägeri	2685262.10	1223034.86	690.829	8.562904	47.152792
3219	Sattel	2691025.36	1215441.45	831.446	8.637359	47.083730
3220	Muotathal	2700359.45	1203684.79	610.515	8.757656	46.976645
3221	Urigen	2700605.76	1192029.06	1276.239	8.758316	46.871777
3222	Klausenpass Niv	2709477.18	1191739.49	1698.376	8.874592	46.867772
3223	WA Klausenpass	2710248.26	1193248.47	1428.988	8.885068	46.881216
3224	Linthal	2718748.28	1198335.67	648.708	8.997885	46.925503
3225	Elm	2732092.00	1198261.00	960.714	9.173022	46.922312
3226	Feusisberg	2697637.05	1226530.97	656.121	8.726811	47.182524
3227	Nätschenkehr	2689520.28	1166188.02	1792.644	8.607877	46.640937
3228	Sogn Gions	2706652.04	1164874.37	1594.315	8.831290	46.626606
3229	Lukmanier Niv	2704445.59	1157796.28	1917.395	8.800879	46.563292
3230	Horgen	2687444.98	1235055.45	424.918	8.594018	47.260617
3231	Dietikon	2672840.45	1250909.61	391.299	8.403648	47.404976
3232	Pont de Tronchets	2580169.49	1080711.19	2230.766	7.183261	45.877729
3235	Hallau	2676651.38	1283499.77	426.129	8.459750	47.697626
3236	Stein a.Rhein	2706812.11	1279670.54	404.407	8.860543	47.658970
3237	Berlingen	2718740.66	1281364.99	417.116	9.019754	47.672153
3238	Uttwil	2743104.09	1272054.42	421.593	9.341051	47.583574
3239	Ardez	2811000.31	1184180.63	1465.763	10.201892	46.775358

Nr LSN	Name	E LV95	N LV95	H LN02	Lon ETRS	Lat ETRS
	St. Triphon Niv	2564048.40	1125337.20	391.303	6.972220	46.278488
	Broglio	2693978.18	1136888.17	703.209	8.660135	46.376786
	Chiasso	2724085.10	1076850.40	232.057	9.035476	45.831937
	San Gottardo Niv	2686542.48	1156616.36	2091.273	8.567191	46.555236
	Bellinzona	2722133.63	1116871.37	241.893	9.020756	46.192226
	Brione	2704134.62	1128170.18	760.190	8.790169	46.296875
	Spitzkehre Surpalits	2695492.63	1167299.81	1844.296	8.686101	46.650109
	Tschamut	2697321.86	1167989.43	1636.192	8.710139	46.656048
	Sörenberg	2641470.71	1187207.57	1566.200	7.982225	46.834723
	Murg	2734931.62	1219540.53	428.815	9.216625	47.113103
	Grellingen	2611399.61	1254597.34	326.452	7.589753	47.442071



A3 Schweren der Punkte

Diese Tabelle enthält Informationen zu den Messungen und den ausgeglichenen Schwerewerten. Die hier aufgelisteten Schweren entsprechen dem Stand Ende 2021 (Lösung LSN2021m). Die jeweils aktuellsten Werte sind aktualisierten Listen oder online (map.geo.admin.ch) zu entnehmen.

Alle Schwerewerte sind auf μGal gerundet. Die Schwerewerte sind sowohl für den Fixpunkt (g Punkt) als auch für den Bodenpunkt (g Boden) angegeben. Die beiden Werte sind bei Punkten, welche bodeneben sind, identisch. Bei horizontal gesetzten HFP bezieht sich der Bodenwert auf den Punkt direkt unterhalb des HFP. Bei Punkten in Schächten bezieht sich dieser auf die Oberfläche des Schachts. Die Schwerewerte auf dem Boden sind für die meisten Punkte geeigneter, um als Anschlusswerte verwendet zu werden. Sie sind üblicherweise weniger von Fehlern des Vertikalgradienten beeinflusst als die auf den Fixpunkt umgerechneten Werte.

Die Kolonne «RMS» gibt die einfache Standardabweichung der Ausgleichung des Bodenpunktes an. Sie ist hier ebenfalls auf μGal gerundet. Sie dürften eher zu optimistisch sein.

Die Spalte «Gradient» enthält den Vertikalgradienten, wie er Ende 2021 verwendet wurde. Diese sind entweder gemessen oder aus SwissAlti3D interpoliert. Die Werte sind auf mGal/m gerundet und das Vorzeichen ist positiv nach oben.

Die Spalte «A» gibt die Anzahl der verwendeten Absolutmessungen in der Ausgleichung an. Falls eine Absolutmessung in mehrere «Projects» aufgeteilt wurde, so ist die Anzahl der «Projects» verwendet worden. Bei den Verknüpfungspunkten zum Ausland wurden teilweise auch publizierte Schwerewerte wie Absolutmessungen behandelt.

Die Spalte «R» zeigt die Anzahl der durchgeführten Relativmessungen seit 2003. Die ebenfalls in der Ausgleichung verwendeten Relativmessungen für SG95 (1992–1994) sind hier nicht eingeschlossen. Eine gemessene Station pro Tag wird als eine Relativmessung gezählt. Falls mit 2 Gravimetern parallel gemessen wurde, so zählt dies als 2 Messungen.

Die Spalte «MJ» gibt das Messjahr der letzten Messung an (absolut oder relativ).



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
0001	Zimmerwald Ref	980512.579	980512.605	0.003	0.257	0	4	2019
0001.0	Zimmerwald Abs	980512.608	980512.608	0.001	0.257	33	39	2021
0001.1	Zimmerwald 800	980511.954	980511.954	0.003	0.342	0	5	2019
0001.2	Zimmerwald 8002	980511.940	980511.940	0.001	0.332	0	33	2021
0002.0	Zürich Abs	980647.960	980647.960	0.001	0.263	4	27	2021
0002.1	Zürich Base	980643.636	980643.636	0.002	0.340	0	8	2021
0003.0	Lausanne Abs	980604.726	980604.726	0.002	0.255	4	18	2019
0003.1	Lausanne Exz	980604.145	980604.145	0.003	0.313	0	11	2019
0003.2	Lausanne B2	980604.270	980604.270	0.002	0.310	0	32	2019
0003.3	Lausanne B3	980604.280	980604.280	0.003	0.306	0	9	2019
0003.4	Lausanne B1	980604.218	980604.218	0.004	0.313	0	6	2019
0004.0	Wabern WAN A	980588.750	980588.750	0.003	0.289	1	9	2020
0004.1	Wabern WAN B	980588.763	980588.763	0.001	0.293	1	40	2021
0004.3	Wabern Exz	980588.080	980588.080	0.001	0.306	0	100	2021
0004.4	Wabern 1997	980588.031	980588.031	0.002	0.306	2	10	2021
0004.5	Wabern WAN C	980588.741	980588.741	0.003	0.290	1	7	2020
0004.6	Wabern WAN D	980588.750	980588.750	0.003	0.289	1	6	2020
0005.0	Basel Abs	980764.192	980764.192	0.002	0.256	2	10	2018
0005.1	Basel Exz	980763.340	980763.340	0.002	0.319	0	14	2021
0006	Brig Ref	980407.329	980407.400	0.008	0.238	0	0	2005
0006.0	Brig Abs	980407.400	980407.400	0.002	0.238	2	15	2016
0006.1	Brig Exz	980407.359	980407.359	0.002	0.263	0	17	2019
0007.0	Andermatt Abs	980304.239	980304.239	0.001	0.151	3	13	2021
0007.1	Andermatt Exz	980305.161	980305.161	0.001	0.139	0	16	2020
0008	M.Ceneri Ref	980511.835	980511.952	0.003	0.285	0	1	2017
0008.0	M.Ceneri Abs	980511.835	980511.835	0.001	0.280	3	8	2021
0008.1	M.Ceneri Exz	980511.932	980511.932	0.002	0.212	0	12	2021
0009	Chur Ref	980453.510	980453.559	0.003	0.195	0	1	2018
0009.0	Chur Abs	980453.713	980453.713	0.001	0.195	3	18	2018
0009.2	Chur Exz 2	980453.815	980453.815	0.002	0.276	0	21	2021
0010.0	Zernez Abs	980285.235	980285.235	0.002	0.230	2	14	2020
0010.2	Zernez Exz2	980284.937	980284.937	0.002	0.256	0	10	2021
0012.0	Interlaken_alt Abs	980505.471	980505.471	0.005	0.236	1	3	2017
0012.1	Interlaken_alt Exz	980505.012	980505.012	0.004	0.242	0	7	2017
0012.2	Interlaken_neu Abs	980506.344	980506.344	0.002	0.256	1	8	2020
0012.3	Interlaken_neu Exz	980508.226	980508.226	0.002	0.228	0	12	2020
0013.2	Jungfrauoch2013	979900.290	979900.290	0.002	0.399	1	10	2020
0013.3	Jungfrauoch Exz E	979899.770	979899.770	0.002	0.334	0	5	2017
0013.4	Jungfrauoch VP1	979900.349	979900.349	0.002	0.355	0	5	2017
0013.6	Jungfrauoch VP3	979900.677	979900.677	0.003	0.317	0	4	2017
0013.7	Jungfrauoch LV95	979860.757	979860.757	0.004	0.457	0	6	2020
0013.8	Jungfrauoch GP	979860.682	979860.682	0.008	0.457	0	2	2017
0014.0	Bäzberg Abs	980310.707	980310.707	0.003	0.215	1	3	2020
0014.1	Bäzberg Exz	980310.667	980310.667	0.003	0.215	0	3	2020
0015.0	Guspisbach Abs	980258.198	980258.198	0.003	0.246	2	3	2020
0015.1	Guspisbach exz	980258.287	980258.287	0.003	0.246	0	3	2020
0016.0	Mont Terri Niche HE	980661.875	980661.875	0.003	0.257	2	12	2021
0016.1	Mont Terri Südportal	980676.739	980676.694	0.004	0.280	0	11	2021
0017.1	CERN PREV	980576.368	980576.368	0.003	0.258	1	4	2019
0017.2	CERN Pt4	980557.478	980557.478	0.004	0.298	1	3	2017
0018.0	Alpiglen	980283.389	980283.389	0.002	0.293	2	8	2020
0018.1	Alpiglen alt	980283.389	980283.389	0.002	0.277	0	5	2017



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
0019.0	Grindelwald	980378.964	980378.964	0.002	0.145	1	6	2020
0019.1	Grindelwald Exz	980379.139	980379.139	0.002	0.141	0	7	2017
0019.2	Grindelwald alt	980389.544	980389.544	0.002	0.268	0	4	2017
0019.3	Grindelwald Bhf	980409.202	980409.202	0.003	0.237	0	6	2017
0019.4	Grindelwald Bhf niv	980409.264	980409.312	0.007	0.237	0	2	2017
0020.0	Kleine Scheidegg abs	980204.623	980204.623	0.002	0.286	1	11	2020
0020.1	Kleine Scheidegg alt	980204.300	980204.300	0.002	0.336	0	7	2017
0020.2	Kleine Scheidegg S1	980204.323	980204.323	0.002	0.322	0	5	2017
0021.0	Eigergletscher abs	980143.133	980143.133	0.002	0.309	1	11	2020
0022.0	Eigerwand abs	979994.169	979994.169	0.002	0.362	1	8	2020
0022.1	Eigerwand alt	979992.711	979992.711	0.002	0.360	0	5	2017
0022.2	Eigerwand LFP G	979994.200	979994.200	0.004	0.360	0	4	2016
0030.0	Freiburg Abs3	980824.625	980824.625	0.004	0.282	3	1	2012
0031.1	Wangen 1	980652.836	980652.836	0.003	0.312	1	3	2021
0031.5	Wangen 5	980653.045	980653.045	0.004	0.280	1	2	2021
0033.0	Tisis Abs	980588.328	980588.328	0.001	0.343	3	3	2017
0033.1	Tisis Exz	980588.170	980588.170	0.002	0.343	1	6	2021
0034.0	Koblach Abs	980612.408	980612.408	0.002	0.296	2	4	2017
0034.1	Koblach Exz	980612.384	980612.384	0.002	0.296	1	6	2021
0035.0	Pfänder abs	980528.031	980528.031	0.001	0.335	3	4	2021
0035.1	Pfänder Exz	980528.039	980528.039	0.003	0.338	1	4	2021
0043.0	Chaux-Neuve	980522.824	980522.824	0.008	0.284	2	1	2015
0044.0	Echenevex	980561.791	980561.791	0.004	0.298	2	3	2017
0045.0	Corbonod-Gignez	980560.399	980560.399	0.006	0.284	2	1	2017
0048.0	Chamonix-Montroc	980273.768	980273.768	0.005	0.241	3	2	2020
0051.0	Beaumont (Piton)	980341.123	980341.123	0.007	0.453	1	2	2017
0053.0	Courfontaine	980635.154	980635.154	0.007	0.313	1	1	2019
0055.0	Grande-Riviere	980541.281	980541.281	0.011	0.316	1	1	2015
0056.0	Oltingue	980726.522	980726.522	0.012	0.301	1	1	2015
0057.1	Vacheresse a	980475.243	980475.243	0.004	0.262	1	3	2020
0058.0	Vers	980485.424	980485.424	0.005	0.322	1	5	2017
1001	Versoix	980585.530	980585.530	0.004	0.298	0	9	2019
1002	Payerne Ref	980610.528	980610.641	0.007	0.313	0	3	2019
1002.1	Payerne	980610.567	980610.567	0.003	0.314	0	12	2019
1003	Monthey	980514.378	980514.378	0.002	0.266	0	17	2020
1004	Porrentruy Ref	980708.589	980708.867	0.011	0.293	0	1	2017
1004.1	Porrentruy	980708.883	980708.883	0.003	0.298	0	7	2021
1005	Biel/Bienne Ref	980653.840	980653.896	0.009	0.224	0	2	2021
1005.1	Biel/Bienne	980653.886	980653.886	0.003	0.227	0	7	2021
1006	Pfynwald	980432.477	980432.477	0.002	0.355	0	10	2020
1007	Thun	980541.840	980541.840	0.002	0.301	0	17	2020
1010	Menzberg	980471.888	980471.888	0.003	0.471	0	5	2019
1011	Sibingen	980708.329	980708.329	0.003	0.295	0	5	2021
1012	Altdorf Ref	980527.523	980527.511	0.005	0.242	0	3	2020
1012.1	Altdorf Niv	980527.486	980527.486	0.002	0.242	0	19	2020
1013	Galgenen	980601.087	980601.087	0.002	0.297	0	17	2020
1014	Acquarossa	980454.566	980454.566	0.002	0.223	0	6	2020
1015	Mendrisio	980559.042	980559.042	0.003	0.278	0	5	2021
1016	Weinfelden Ref	980672.021	980672.071	0.004	0.314	0	4	2021
1016.1	Weinfelden	980672.079	980672.079	0.002	0.315	0	15	2021
1018	Maloja	980224.831	980224.831	0.003	0.365	0	7	2021
1019	Aarburg	980681.899	980681.899	0.001	0.264	0	57	2021



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
2001	Bossy MN95	980578.942	980578.884	0.004	0.307	0	6	2019
2002	La Givrine	980455.458	980455.458	0.006	0.314	0	4	2019
2003	Le Lieu	980504.229	980504.229	0.006	0.311	0	3	2019
2004	Essertines	980536.836	980536.759	0.007	0.333	0	3	2015
2005	Col des Etroits	980491.189	980491.189	0.004	0.318	0	4	2018
2006	La Sarraz	980595.595	980595.595	0.003	0.330	0	8	2019
2007	Echandens	980598.623	980598.559	0.005	0.322	0	5	2019
2008	Travers	980574.957	980574.957	0.004	0.306	0	3	2018
2009	Savigny	980529.288	980529.229	0.005	0.296	0	7	2020
2010	Moudon	980530.138	980530.072	0.004	0.333	0	5	2019
2011	La Chaux-de-Fonds	980510.069	980510.014	0.005	0.347	0	4	2018
2012	Forel MN95	980618.564	980618.490	0.003	0.323	0	6	2019
2013	Chailly	980548.559	980548.559	0.005	0.362	0	4	2019
2014	Fahy	980678.680	980678.623	0.003	0.315	0	4	2019
2015	St. Triphon	980521.881	980521.881	0.004	0.389	0	4	2020
2016	Chasseral	980421.203	980421.203	0.005	0.431	0	5	2021
2017	La Tour-de-Trême	980507.098	980507.098	0.003	0.384	0	7	2020
2018	Martigny	980426.207	980426.207	0.004	0.373	0	4	2020
2018.1	Martigny RAB	980435.651	980435.651	0.004	0.360	0	4	2020
2019	Vully	980586.014	980585.951	0.005	0.372	0	8	2019
2020	Fribourg MN95	980554.464	980554.464	0.006	0.396	0	4	2019
2021	Les Rangiers	980617.884	980617.804	0.003	0.348	0	7	2021
2022	Reconvilier	980599.975	980599.923	0.004	0.328	0	4	2019
2023	Bourg St.Pierre	980201.638	980201.638	0.003	0.330	0	4	2020
2024	Saanen	980414.084	980414.084	0.003	0.358	0	9	2020
2024.1	Saanen neu	980422.111	980422.111	0.003	0.318	0	7	2020
2025	Seedorf	980610.312	980610.258	0.004	0.322	0	6	2018
2026	Guggisberg	980454.726	980454.666	0.003	0.334	0	5	2019
2027	Sion	980439.745	980439.745	0.003	0.393	0	7	2020
2028	Metzerlen	980702.593	980702.531	0.004	0.296	0	4	2017
2029	Ringgenberg	980499.567	980499.567	0.003	0.354	0	3	2019
2030	Les Haudères	980242.471	980242.471	0.003	0.279	0	4	2020
2031	Riedholz	980652.276	980652.220	0.004	0.297	0	5	2019
2032	Engstligenalp	980210.948	980210.948	0.007	0.403	0	2	2017
2033	Chrischona	980735.436	980735.436	0.005	0.339	0	3	2018
2034	Vogelberg	980523.913	980523.913	0.003	0.517	0	7	2020
2034.1	Vogelberg HP	980534.830	980534.830	0.003	0.425	0	4	2020
2035	Lueg	980546.993	980546.904	0.003	0.372	0	4	2019
2036	Jeizinen	980257.099	980257.099	0.008	0.422	0	2	2016
2037	Signau	980548.222	980548.163	0.004	0.309	0	4	2019
2038	Zermatt	980213.068	980213.068	0.006	0.329	0	2	2016
2040	Sissacherfluh	980653.989	980653.989	0.003	0.388	0	6	2018
2041	Langenthal	980629.680	980629.624	0.004	0.329	0	4	2019
2043	Wartburg	980626.562	980626.562	0.003	0.466	0	4	2020
2045	Saas Fee	980196.399	980196.399	0.004	0.333	0	2	2016
2046	Simplon	980175.219	980175.219	0.003	0.335	0	4	2019
2047	Laufenburg LV95	980730.686	980730.686	0.006	0.357	0	6	2018
2048	Knutwil	980608.527	980608.472	0.004	0.319	0	8	2017
2049	Brienz	980498.632	980498.590	0.002	0.279	0	5	2019
2050	Fieschertal	980331.536	980331.536	0.002	0.331	0	5	2019
2051	Lenzburg	980661.767	980661.670	0.003	0.425	0	4	2018
2052	Alpnach	980496.190	980496.190	0.003	0.372	0	4	2019



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
2053	Grimsel	980167.957	980167.957	0.004	0.363	0	3	2019
2054	Crodo d'Ossola	980451.715	980451.715	0.004	0.229	0	2	2016
2055	Lägern	980593.330	980593.330	0.003	0.462	0	5	2018
2056	Sins	980629.976	980629.925	0.004	0.297	0	5	2020
2058	Hönggerberg	980645.451	980645.451	0.002	0.340	0	16	2021
2059	Oberarth	980582.963	980582.889	0.003	0.356	0	8	2020
2060	Buchberg	980678.146	980678.093	0.006	0.353	0	4	2018
2061	San Gottardo alt	980189.021	980189.021	0.004	0.411	0	4	2015
2061.1	San Gottardo neu	980190.297	980190.297	0.003	0.393	0	8	2020
2062	Bignasco	980474.328	980474.328	0.004	0.299	0	2	2016
2063	Altdorf LV95	980527.650	980527.581	0.004	0.265	0	7	2020
2064	Brütten	980629.270	980629.270	0.003	0.390	0	6	2021
2065	Pfannenstiel	980559.742	980559.742	0.004	0.365	0	3	2019
2066	Oberalp	980203.434	980203.434	0.003	0.334	0	7	2020
2067	Einsiedeln	980499.739	980499.739	0.003	0.325	0	7	2020
2068	Dalpe	980343.879	980343.879	0.002	0.340	0	8	2016
2069	Stammheim	980676.826	980676.748	0.004	0.323	0	6	2021
2070	Ascona	980644.878	980644.878	0.003	0.332	0	4	2021
2071.1	Schauenberg neu	980565.630	980565.554	0.006	0.448	0	3	2019
2072	Klausenpass	980242.765	980242.686	0.003	0.283	0	4	2020
2073	Bachtel	980564.403	980564.343	0.003	0.316	0	4	2019
2074	Biasca alt	980517.654	980517.614	0.004	0.248	0	8	2014
2074.1	Biasca neu	980490.329	980490.329	0.002	0.259	0	9	2020
2076	Sonvico	980472.570	980472.570	0.005	0.415	0	3	2021
2077	Generoso EUREF	980259.562	980259.562	0.012	0.494	0	1	2021
2077.1	Generoso LV95	980280.483	980280.483	0.013	0.432	0	1	2021
2077.2	Generoso 23F	980255.798	980255.798	0.013	0.488	0	1	2021
2078	Glarus	980539.197	980539.132	0.002	0.263	0	8	2020
2079	Brigels	980325.497	980325.497	0.003	0.389	0	3	2015
2080	Nollen	980598.721	980598.721	0.003	0.384	0	9	2021
2081	Oberhelfenschwil	980547.965	980547.965	0.004	0.352	0	5	2021
2082	Zervreilasee	980187.220	980187.114	0.007	0.321	0	2	2015
2083	Dettighofen	980666.502	980666.439	0.003	0.312	0	6	2021
2084	Mesocco	980397.594	980397.594	0.002	0.301	0	5	2017
2085	Schwägalp	980447.474	980447.474	0.003	0.353	0	4	2021
2086	Bonaduz	980450.576	980450.443	0.002	0.266	0	10	2018
2087	Colico	980562.928	980562.928	0.007	0.301	0	2	2016
2088	Goldach	980632.623	980632.623	0.003	0.346	0	7	2021
2089	Sargans	980531.843	980531.843	0.003	0.341	0	5	2018
2090	Andeer	980345.499	980345.499	0.003	0.276	0	4	2017
2091	Filisur	980343.260	980343.183	0.003	0.350	0	4	2018
2092	Pfänder LV95	980519.241	980519.241	0.004	0.393	0	4	2021
2093	Davos	980277.829	980277.752	0.003	0.276	0	12	2021
2094	Berninapass	980121.561	980121.561	0.004	0.335	0	4	2021
2095	Zernez	980271.613	980271.613	0.003	0.334	0	5	2021
2096	Ramosch	980299.615	980299.615	0.003	0.321	0	5	2021
2097	Santa Maria	980293.428	980293.386	0.003	0.264	0	4	2021
2098	St. Margrethen Niv	980638.585	980638.681	0.004	0.274	0	2	2021
2098.1	St. Margrethen	980638.672	980638.672	0.003	0.274	0	5	2021
2099	Vinadi	980375.251	980375.251	0.004	0.247	0	4	2021
2100.1	L'Isle	980572.044	980572.044	0.004	0.284	0	7	2019
2100.2	Mont-la-Ville	980537.745	980537.745	0.005	0.310	0	7	2019



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
2100.3	Mont-la-Ville B	980505.032	980505.032	0.004	0.239	0	7	2019
2100.4	Mollendruz	980473.057	980473.057	0.005	0.330	0	7	2019
2101	Ofenpass	980158.130	980158.130	0.003	0.338	0	4	2021
3001	Spiez	980516.811	980516.912	0.005	0.308	0	3	2019
3001.3	Spiez exz 3	980516.692	980516.692	0.003	0.315	0	6	2020
3001.4	Spiez exz 4	980516.698	980516.698	0.004	0.315	0	2	2019
3002	Gampel	980408.311	980408.417	0.004	0.230	0	5	2019
3003	Kandersteg	980358.071	980358.238	0.003	0.257	0	4	2019
3004	Wichtrach	980567.680	980567.746	0.004	0.302	0	3	2018
3005	Lachen	980605.576	980605.662	0.008	0.296	0	6	2020
3006	Sargans Niv.	980533.178	980533.731	0.002	0.335	0	5	2018
3008	Chur Niv	980460.150	980460.222	0.004	0.248	0	2	2018
3009	Reichenau	980460.662	980460.662	0.003	0.261	0	8	2017
3010	Trun	980406.472	980406.482	0.004	0.250	0	3	2015
3011	Disentis	980359.530	980359.562	0.004	0.161	0	6	2020
3012	Sedrun	980318.556	980318.781	0.011	0.250	0	2	2015
3013	Thusis	980426.147	980426.325	0.003	0.266	0	4	2018
3014	Splügen	980282.317	980282.361	0.003	0.278	0	3	2017
3015	Hinterrhein	980254.713	980254.775	0.005	0.223	0	3	2017
3016	San Bernardino	980260.261	980260.261	0.007	0.236	0	2	2015
3017	Roveredo	980536.395	980536.880	0.003	0.227	0	4	2017
3018	Castione	980560.150	980560.210	0.017	0.261	0	5	2017
3019	Soazza	980427.775	980427.830	0.003	0.221	0	3	2016
3020	Luzern	980599.633	980599.633	0.004	0.300	0	3	2017
3021	Birrfeld	980692.443	980692.393	0.006	0.312	0	5	2020
3022	Neuchâtel CHYN	980634.001	980633.963	0.005	0.320	0	6	2021
3023	Yverdon	980616.986	980617.109	0.009	0.299	0	5	2019
3024	Oulens	980581.004	980581.004	0.005	0.316	0	4	2019
3025	Vevey	980574.395	980574.395	0.004	0.313	0	5	2020
3026	Masans	980463.184	980463.297	0.007	0.282	0	3	2018
3027	Illanz	980443.406	980443.477	0.007	0.271	0	2	2015
3028	Bern	980596.958	980597.107	0.005	0.317	0	4	2019
3029	La Neuveville	980646.807	980647.108	0.009	0.264	0	2	2019
3030	Neuchâtel Obs.	980633.710	980633.789	0.006	0.313	0	4	2019
3031	Avenches	980612.639	980612.661	0.007	0.324	0	3	2019
3032	Fribourg Cath.	980571.354	980571.354	0.007	0.339	0	3	2019
3033	Flamatt	980591.622	980591.622	0.017	0.206	0	2	2019
3034	Schüpfen	980616.647	980616.647	0.006	0.300	0	3	2018
3036	Aarau	980691.377	980691.504	0.006	0.311	0	4	2020
3037	Baden	980698.131	980698.282	0.006	0.302	0	2	2017
3038	Reiden	980648.073	980648.122	0.006	0.286	0	2	2017
3039	Nottwil	980600.867	980600.867	0.005	0.324	0	2	2017
3040	Lugano	980590.615	980590.615	0.004	0.302	0	2	2016
3042	Osogna	980519.833	980519.876	0.008	0.254	0	2	2016
3043	Wassen LV95	980400.936	980400.936	0.002	0.277	0	5	2019
3044	Cadenazzo	980593.616	980593.692	0.003	0.273	0	4	2017
3045	Münster VS	980300.836	980300.901	0.004	0.258	0	2	2019
3046	Gletsch	980236.181	980236.181	0.004	0.224	0	2	2019
3047	Sierre	980450.627	980450.627	0.005	0.256	0	3	2020
3048	Sion Niv	980453.771	980454.447	0.003	0.278	0	6	2020
3049	Martigny Niv	980446.698	980446.821	0.003	0.273	0	6	2020
3050	Rodont	980209.554	980209.554	0.008	0.300	0	1	2016



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
3051	Airolo Bahnhof	980365.190	980365.204	0.004	0.234	0	1	2016
3052	Airolo Kirche	980360.086	980360.099	0.003	0.224	0	4	2020
3053	Bignasco niv	980491.275	980491.838	0.012	0.230	0	1	2016
3054	Simplon Hospiz	980177.073	980177.073	0.003	0.273	0	2	2019
3055	Lalden	980403.591	980403.591	0.006	0.223	0	2	2019
3056	Zermatt Kirche	980222.257	980222.269	0.008	0.233	0	1	2016
3057	Herbriggen	980253.947	980253.981	0.006	0.169	0	1	2016
3058	St.Niklaus	980294.761	980294.833	0.006	0.213	0	1	2016
3059	Bulle	980506.344	980506.368	0.006	0.298	0	2	2019
3060	Farvagny-le-Grand	980538.749	980538.849	0.006	0.312	0	2	2019
3061	Oensingen	980669.383	980669.429	0.005	0.287	0	3	2019
3062	Olten	980688.329	980688.427	0.005	0.307	0	2	2018
3063	Kaiseraugst	980765.124	980765.254	0.005	0.249	0	4	2018
3064	Basel Pauluskirche	980760.662	980760.743	0.007	0.314	0	3	2018
3065	Laufen	980719.211	980719.268	0.011	0.285	0	1	2017
3066	Delémont	980695.569	980695.710	0.007	0.301	0	3	2021
3067	Glovelier	980676.021	980676.034	0.007	0.273	0	2	2019
3068	Tavannes	980610.889	980610.935	0.008	0.269	0	2	2019
3069	Gams	980573.976	980573.992	0.003	0.311	0	4	2021
3070	Altstätten	980617.230	980617.318	0.006	0.296	0	3	2021
3071	Rorschach	980646.794	980646.864	0.004	0.317	0	3	2021
3072	Bottighofen	980686.222	980686.331	0.005	0.313	0	3	2021
3073	Kreuzlingen	980687.367	980687.436	0.005	0.302	0	3	2021
3074	Frauenfeld	980680.720	980680.774	0.003	0.282	0	4	2021
3075	Schaffhausen	980719.577	980719.691	0.005	0.300	0	3	2021
3076	Kaiserstuhl	980713.642	980713.720	0.005	0.339	0	3	2018
3077	Zollikofen	980602.146	980602.191	0.004	0.303	0	3	2019
3078	Lyss	980641.585	980641.640	0.004	0.303	0	2	2018
3079	Sursee	980617.043	980617.167	0.010	0.302	0	2	2017
3080	St.Gallen Kreuzbleiche	980590.597	980590.659	0.004	0.311	0	3	2021
3081	Küssnacht	980589.971	980590.124	0.009	0.307	0	3	2020
3082	Bennau	980513.196	980513.279	0.006	0.331	0	3	2020
3083	Rodi	980386.491	980387.155	0.040	0.229	0	1	2013
3084	Lavorgo	980442.411	980442.384	0.021	0.223	0	1	2013
3085.1	Burglauenen	980418.458	980418.458	0.003	0.189	0	4	2020
3086	Blitzingen	980313.555	980313.555	0.004	0.247	0	2	2019
3087	Brig Bahnhof	980410.430	980410.495	0.005	0.216	0	2	2019
3088	Brig Stockalper	980409.809	980409.889	0.005	0.255	0	2	2019
3089	Herzogenbuchsee	980645.893	980646.131	0.020	0.329	0	1	2016
3090	Murgenthal	980673.329	980673.422	0.007	0.299	0	2	2019
3091	Birmensdorf	980622.380	980622.334	0.004	0.328	0	3	2020
3092	Merenschwand	980647.222	980647.329	0.005	0.306	0	3	2020
3093	Gisikon	980615.875	980615.937	0.006	0.231	0	3	2020
3094	Frutigen	980455.463	980455.463	0.006	0.332	0	2	2019
3095	Kandergrund	980423.262	980423.306	0.004	0.291	0	2	2019
3096	Adelboden	980356.575	980356.684	0.007	0.248	0	1	2017
3097	Lenk	980389.453	980389.495	0.016	0.261	0	1	2017
3098	Zweisimmen	980450.078	980450.317	0.005	0.299	0	3	2020
3099	Weissenburg	980496.610	980496.669	0.005	0.212	0	3	2020
3100	Lütschental	980441.889	980441.971	0.003	0.199	0	4	2020
3101	Eismeer	979952.134	979952.134	0.003	0.248	0	4	2020
3101.1	Eismeer LFP	979951.615	979951.615	0.004	0.205	0	2	2020



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
3102	Estavayer	980619.577	980619.728	0.010	0.321	0	2	2019
3103	Echallens	980569.483	980569.625	0.004	0.317	0	3	2019
3104	Cossonay	980587.977	980588.124	0.008	0.329	0	2	2019
3105	Kerzers	980627.999	980628.095	0.008	0.319	0	2	2019
3106	Ins	980631.042	980631.052	0.009	0.306	0	2	2019
3107	St.Aubin	980626.361	980626.409	0.008	0.300	0	2	2019
3108	Vuiteboeuf	980593.139	980593.186	0.006	0.297	0	3	2019
3109	Genève rade	980572.390	980572.390	0.035	0.320	0	1	2017
3110	CERN refETHZ2017	980577.858	980577.858	0.004	0.295	0	6	2019
3111	Sissach	980720.497	980720.614	0.006	0.299	0	2	2018
3112	Hornussen	980712.988	980713.107	0.010	0.278	0	3	2018
3113	Brugg	980708.188	980708.310	0.006	0.311	0	6	2018
3114	Hauenstein	980639.679	980639.842	0.009	0.296	0	1	2018
3115	Liestal	980737.787	980737.940	0.005	0.307	0	1	2018
3116	Boudevilliers	980584.136	980584.196	0.008	0.301	0	2	2019
3117	La Chaux-de-Fonds	980554.002	980554.070	0.013	0.326	0	1	2018
3118	La Chaux du Milieu	980529.023	980529.109	0.011	0.310	0	1	2018
3119	Fleurier	980578.685	980578.728	0.018	0.285	0	1	2018
3120	Orbe	980610.704	980610.772	0.007	0.311	0	2	2019
3121	Pfyn	980686.661	980686.722	0.005	0.305	0	3	2021
3122	Wil	980626.719	980626.719	0.005	0.319	0	3	2021
3123	Winterthur	980670.836	980670.836	0.003	0.303	0	4	2021
3124	Grüsch	980476.153	980476.393	0.003	0.240	0	4	2020
3125	Schiers	980452.082	980452.036	0.003	0.288	0	4	2020
3126	Küblis	980421.543	980421.625	0.003	0.228	0	4	2020
3127	Flüelapass	980116.667	980116.667	0.004	0.286	0	5	2021
3128	Susch	980293.594	980293.594	0.003	0.157	0	5	2021
3129	Sta. Maria	980287.693	980287.970	0.004	0.261	0	2	2021
3130	Scuol	980341.692	980341.771	0.004	0.237	0	3	2021
3131	Poschiavo	980355.347	980355.938	0.005	0.233	0	2	2021
3132	Brusio	980398.230	980398.295	0.004	0.225	0	2	2021
3134	S-chanf	980241.784	980241.910	0.004	0.269	0	2	2021
3135	Samedan	980228.199	980228.281	0.004	0.272	0	2	2021
3136	Silvaplana	980218.580	980218.599	0.003	0.278	0	4	2021
3137	Maloja Niv	980226.458	980226.623	0.004	0.300	0	2	2021
3138	Casaccia	980281.078	980281.078	0.005	0.216	0	2	2021
3139	Vicosoprano	980338.979	980339.020	0.004	0.233	0	2	2021
3140	Castasegna	980412.190	980412.301	0.003	0.222	0	2	2021
3141	Bivio	980232.713	980232.713	0.003	0.232	0	3	2021
3142	Mulegns	980270.152	980270.237	0.004	0.160	0	3	2021
3143	Savognin	980325.045	980325.122	0.005	0.274	0	3	2021
3144	Tiefencastel	980391.470	980391.495	0.003	0.158	0	4	2021
3145	Klosters	980344.543	980344.746	0.004	0.250	0	3	2020
3146	Sumiswald	980566.377	980566.432	0.005	0.305	0	2	2019
3147	Bätterkinden	980637.423	980637.535	0.005	0.331	0	2	2019
3148	Schwarzenburg	980523.964	980524.117	0.008	0.312	0	2	2019
3149	Zollhaus	980490.097	980490.097	0.008	0.188	0	1	2019
3150	Giffers	980525.823	980526.011	0.006	0.303	0	2	2019
3151	Henniez	980592.024	980592.058	0.007	0.284	0	1	2019
3152	Moudon Niv	980575.931	980576.056	0.007	0.286	0	1	2019
3153	Rue	980537.222	980537.243	0.010	0.364	0	1	2019
3154	Lausanne niv	980571.358	980571.358	0.006	0.363	0	1	2019



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
3155	Morges	980609.308	980609.357	0.009	0.305	0	1	2019
3156	Rolle	980609.034	980609.386	0.021	0.298	0	1	2019
3157	Les Allévays	980555.025	980555.025	0.005	0.295	0	1	2019
3158	La Cure	980469.524	980469.576	0.005	0.235	0	1	2019
3159	Le Brassus	980502.611	980502.690	0.006	0.290	0	1	2019
3160	Le Pont	980506.038	980506.066	0.006	0.280	0	1	2019
3161	Lignerolle	980558.987	980559.177	0.008	0.292	0	1	2019
3162	Jongny	980539.886	980539.937	0.005	0.300	0	3	2020
3163	Turbenthal	980633.725	980633.725	0.008	0.283	0	1	2019
3164	Bauma	980601.874	980602.389	0.007	0.282	0	1	2019
3165	Wetzikon	980616.731	980617.299	0.008	0.301	0	1	2019
3166	Rüti ZH	980610.879	980611.481	0.008	0.308	0	1	2019
3167	Uznach	980608.323	980608.422	0.007	0.292	0	1	2019
3168	Grosshöchstetten	980538.973	980538.973	0.006	0.316	0	1	2019
3169	Langnau	980550.347	980550.465	0.005	0.319	0	1	2019
3170	Wiggen	980509.949	980509.993	0.006	0.275	0	1	2019
3171	Schüpfheim	980527.308	980527.264	0.007	0.315	0	1	2019
3172	Wolhusen	980580.331	980580.837	0.005	0.300	0	1	2019
3173	Willisau	980601.377	980601.445	0.007	0.284	0	1	2019
3174	Engelberg	980428.184	980428.232	0.005	0.243	0	1	2019
3175	Grafenort	980514.698	980514.743	0.004	0.247	0	1	2019
3176	Sarnen	980560.292	980560.783	0.004	0.278	0	1	2019
3177	Lungern	980489.231	980489.298	0.004	0.223	0	1	2019
3178	Brünigen	980447.641	980447.641	0.004	0.315	0	1	2019
3179	Huttwil	980588.079	980588.182	0.009	0.321	0	1	2019
3180	Ramiswil	980642.895	980642.919	0.003	0.296	0	3	2020
3180.1	Ramiswil Kapelle	980602.276	980602.276	0.004	0.360	0	2	2020
3181	Solothurn	980663.291	980663.381	0.014	0.299	0	1	2019
3181.1	Solothurn Grav	980663.192	980663.192	0.009	0.294	0	1	2019
3182	Schwarzenegg	980474.504	980474.622	0.005	0.347	0	1	2019
3183	Thun niv	980537.738	980537.906	0.007	0.330	0	1	2019
3184	Brienz Niv	980506.860	980506.971	0.004	0.358	0	2	2019
3185	Innertkirchen	980478.375	980478.375	0.003	0.220	0	2	2019
3186	Guttannen	980380.383	980380.441	0.005	0.231	0	1	2019
3187	Brig Kollegiumskirche	980407.069	980407.132	0.005	0.300	0	1	2019
3188	Goppenstein	980304.324	980304.335	0.004	0.042	0	1	2019
3189	Fafleralp	980229.400	980229.400	0.005	0.242	0	1	2019
3190	Rochefort	980578.659	980578.737	0.012	0.289	0	1	2019
3191	Moutier	980656.357	980657.115	0.006	0.276	0	1	2019
3192	Boncourt	980734.894	980735.150	0.007	0.299	0	2	2021
3193	Saignelégier	980581.884	980582.047	0.010	0.313	0	1	2019
3194	St.Imier	980593.256	980593.371	0.007	0.275	0	1	2019
3195	Gadmen	980372.114	980372.114	0.005	0.270	0	1	2019
3196	Sustenpass	980178.586	980178.586	0.008	0.373	0	1	2019
3197	Färnigen	980317.029	980317.121	0.006	0.223	0	1	2019
3198	Husen	980354.872	980354.931	0.007	0.198	0	1	2019
3199	Andermatt	980306.702	980306.876	0.008	0.143	0	1	2019
3200	Altdorf	980524.486	980524.571	0.005	0.259	0	3	2020
3201	Sanetschpass	980151.067	980151.067	0.004	0.326	0	3	2020
3201.1	Sanetschsee	980191.314	980191.314	0.003	0.368	0	5	2020
3202	Gsteig	980368.336	980368.389	0.003	0.251	0	4	2020
3203	St.Gingolph	980560.597	980560.685	0.007	0.295	0	2	2020



Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
3204	Aigle	980529.279	980529.215	0.007	0.263	0	2	2020
3205	Sembracher	980390.785	980390.860	0.005	0.249	0	2	2020
3206	Verbier	980256.552	980256.552	0.004	0.301	0	2	2020
3207	Orsières	980343.974	980343.974	0.004	0.226	0	2	2020
3208	Bourg St.Pierre Niv	980200.044	980200.044	0.003	0.240	0	2	2020
3209	Grand St.Bernard	980046.959	980046.959	0.006	0.284	0	2	2020
3210	Col de la Forclaz	980255.875	980255.875	0.005	0.327	0	2	2020
3211	Le Châtelard	980321.527	980321.527	0.007	-0.025	0	2	2020
3212	Grimentz	980230.651	980230.651	0.004	0.355	0	2	2020
3213	Noës	980450.162	980450.199	0.006	0.247	0	2	2020
3214	Aigle-Le Sépey	980473.863	980473.863	0.006	0.128	0	1	2020
3215	Boniswil	980652.536	980652.943	0.007	0.304	0	2	2020
3216	Schwarzenbach	980586.764	980586.723	0.006	0.372	0	2	2020
3217	Cham	980624.755	980624.896	0.007	0.308	0	2	2020
3218	Neuägeri	980557.252	980557.844	0.017	0.279	0	2	2020
3219	Sattel	980515.426	980515.825	0.006	0.373	0	2	2020
3220	Muotathal	980512.576	980512.647	0.007	0.237	0	2	2020
3221	Urigen	980374.757	980374.757	0.005	0.299	0	2	2020
3222	Klausenpass Niv	980282.557	980282.557	0.005	0.220	0	2	2020
3223	WA Klausenpass	980330.751	980330.751	0.009	0.203	0	1	2020
3224	Linthal	980474.429	980474.537	0.005	0.226	0	2	2020
3225	Elm	980415.230	980415.335	0.004	0.230	0	2	2020
3226	Feusisberg	980563.391	980563.429	0.007	0.173	0	2	2020
3227	Nätschenkehr	980246.526	980246.526	0.004	0.335	0	2	2020
3228	Sogn Gions	980273.699	980273.699	0.003	0.248	0	3	2020
3229	Lukmanier Niv	980214.336	980214.336	0.004	0.270	0	3	2020
3230	Horgen	980632.268	980632.339	0.008	0.296	0	2	2020
3231	Dietikon	980676.820	980676.902	0.006	0.305	0	4	2021
3232	Pont de Tronchets	980093.057	980093.057	0.004	0.247	0	2	2020
3235	Hallau	980724.374	980724.374	0.005	0.292	0	2	2021
3236	Stein a.Rhein	980700.328	980700.328	0.009	0.308	0	2	2021
3237	Berlingen	980693.364	980693.528	0.005	0.298	0	2	2021
3238	Uttwil	980673.374	980673.594	0.004	0.316	0	2	2021
3239	Ardez	980293.670	980293.743	0.004	0.242	0	4	2021

Nr LSN	Name	g Punkt	g Boden	RMS	Gradient	A	R	MJ
	St. Triphon Niv	980525.810			0.287	0	0	1956
	Broglio				0.212	0	0	
	Chiasso	980577.517			0.283	0	0	1968
	San Gottardo Niv	980193.090			0.285	0	0	1998
	Bellinzona	980579.977			0.163	0	0	1980
	Brione				0.218	0	0	
	Spitzkehre Surpalits	980239.400			0.318	0	0	1999
	Tschamut	980276.100			0.202	0	0	1955
	Sörenberg				0.379	0	0	
	Murg	980566.100				0	0	2000
	Grellingen	980727.677			0.285	0	0	1965