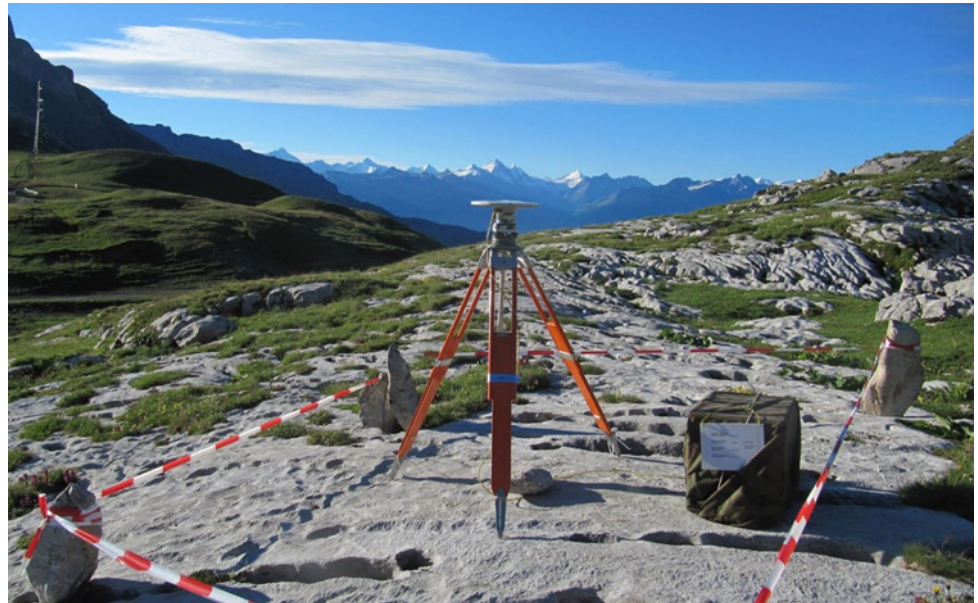


Neues Schweizer Höhensystem



© swisstopo

Studie zur Modernisierung des Schweizer Höhenbezugssystems und -rahmens

Teil I – Grundlagen, Stand der Technik und internationaler Vergleich

(Angepasste Version, Korrektur auf S. 13)

Dr. Daniel Willi
Dr. Andreas Schlatter
Dr. Urs Marti
Dr. Sébastien Guillaume



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo

Titelbild: Statische GNSS-Messungen auf dem LV95-Punkt «Col du Sanetsch» (S. Condamin)

Impressum

© 2023 Bundesamt für Landestopografie swisstopo

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Landestopografie swisstopo



Management Summary

Höhen können rein geometrisch oder physikalisch definiert werden. Eine GNSS-Messung wird zu einer sogenannten ellipsoidischen Höhe führen, die rein geometrisch ist. Diese Art der Höhenangabe entspricht jedoch nicht den Anforderungen der Praxis. Nur sogenannte physikalische Höhen – d. h. Höhen, die das Schwerefeld der Erde berücksichtigen – erfüllen alle praktischen Anforderungen und ermöglichen die Kombination von Messungen aus verschiedenen Techniken. Dies ist wichtig, um verschiedene Messungen kombinieren zu können, zum Beispiel von Nivellement und GNSS-Messungen.

In der **Schweiz** gibt es zwei Höhensysteme: LN02 als offizielles System und LHN95, ein strenges System, das jedoch nie offiziell eingeführt wurde. LHN95 basiert auf geopotentiellen Koten und orthometrischen Höhen, die eine Art physikalische Höhe darstellen. Die Hauptunterschiede zu LN02, das immer noch offiziell in Kraft ist, sind:

1. LN02 basiert auf Gebrauchshöhen, einer weniger präzisen Form von Höhendaten. Eine Folge davon ist eine Abweichung von 1 cm pro 100 m Höhenunterschied, bzw. 100 ppm (Skalierungsfaktor).
2. Die vertikalen Bewegungen der Schweiz werden in LN02 nicht berücksichtigt. Dies führt zu Fehlern in der Grössenordnung von 10 bis 20 cm.
3. Die Messungen, auf denen LN02 beruht, sind über 100 Jahre alt. Die Versäumnisse bei diesen Messungen führen zu zusätzlichen Abweichungen von 10 bis 20 cm.

In der Nähe der Nivellementlinien verfügt man mit LN02 jedoch über eine relative Genauigkeit in der Grössenordnung von mm/km.

Inzwischen gibt es internationale Bemühungen zur Vereinheitlichung der Höhenmessung. Das **European Vertical Reference System (EVRS)** basiert auf Nivellementmessungen, die die einzelnen Länder an das Rechenzentrum des deutschen BKG liefern. Die Ergebnisse werden dann an die teilnehmenden Länder weitergeleitet. Das **Internationale Höhenreferenzsystem (IHR)** verfolgt einen völlig anderen Ansatz. Unter der Leitung der *International Association of Geodesy (IAG)* einigen sich die Mitgliedsländer auf numerische Konventionen, sodass jedes Land unabhängig kompatible Höhen bestimmen kann. Dies geschieht auf der Grundlage von Geoidmodellen und GNSS-Messungen.

Im internationalen Vergleich hat eine Reihe von Ländern – wie Norwegen, Schweden, Neuseeland oder die USA – in den letzten Jahren neue Höhensysteme eingeführt. Alle diese Länder hatten Höhenreferenzsysteme, die aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts stammten. Diese Änderungen wurden entweder zum Zweck der Vereinheitlichung oder mit dem Ziel, die Genauigkeit zu verbessern, eingeleitet. Oder aber es standen Überlegungen zu den Wartungskosten der Fixpunkte im Vordergrund.

Die am häufigsten vorkommenden **Höhendaten** sind Normalhöhen, orthometrische Höhen sowie Gebrauchshöhen. Die letztgenannte Höhenart wird für neue Systeme nicht mehr berücksichtigt. Insgesamt scheinen Normalhöhen von den meisten Ländern bevorzugt zu werden. In jedem Fall werden bei Systemwechseln strenge Höhensysteme eingeführt.

Während die meisten europäischen Länder bei der Erstellung eines Bezugsrahmens weiterhin auf **Nivellementmessungen** setzen, erstellen einige Länder – wie die USA oder Neuseeland – kontinentale Höhenbezugsrahmen über die Bestimmung des Geoids, eventuell unterstützt durch aerogravimetrische Messungen.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt, die Untersuchungen zum neuen Höhenreferenzsystem fortzusetzen. Dazu gehören die Entwicklung numerischer und rechnerischer Konventionen sowie die Prüfung wissenschaftlicher Software, insbesondere von Software zur Geoidbestimmung. Die vorgeschlagenen Arbeiten werden unabhängig davon, ob ein neues Höhenreferenzsystem eingeführt wird oder nicht, für swisstopo von Nutzen sein.





Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
2. Theoretische Grundlagen der Höhenbestimmung	11
2.1. Geometrische Höhen	11
2.2. Physikalische Höhen	12
2.2.1. Geopotentielle Koten	12
2.2.2. Arten von physikalischen Höhen	12
2.2.3. Schwerepotential	12
2.3. Beziehung zwischen geometrischen und physikalischen Höhen	13
2.3.1. Geoid	13
2.3.2. Quasigeoid	13
2.4. Anforderungen an ein Höhensystem	14
2.5. Kinematik	14
2.6. Gezeiten	15
2.6.1. Verwendung von Gezeitsystemen	16
2.6.2. Umrechnung zwischen Gezeitsystemen	16
2.7. Definition eines Höhenbezugssystems	17
2.8. Umwandlungen zwischen Höhensystemen	17
2.8.1. Besonderheiten von lokalen Höhenbezugssystemen	18
2.9. Techniken zur Höhenbestimmung	18
2.9.1. Geometrisches Nivellement	18
2.9.2. Geoidmodell und GNSS	18
2.9.3. Trigonometrisches Nivellement	19
2.9.4. Barometrisches Nivellement	19
2.9.5. Chronographisches Nivellement	19
2.9.6. Hydrostatisches Nivellement	19
2.10. Definition der Genauigkeit	19
2.11. Verwendung von Höhen in der Praxis	20
2.11.1. Zukünftige Entwicklung der Fallbeispiele	21
3. Das Höhenreferenzsystem Schweiz	23
3.1. Präzisionsnivellement der Schweizerischen Geodätischen Kommission (1864 – 91)	23
3.2. Das Versicherungsnivellement des Eidgenössischen Topographischen Bureau (1893 – 1902)	23
3.3. Das Landesnivellement und die offiziellen Gebrauchshöhen der Schweiz LN02	24
3.4. Das nationale Höhenmessnetz 1995 (LHN95)	26
3.4.1. Vorgeschichte und Systemdefinitionen	26
3.4.2. Realisierung des Höhenreferenzrahmens LHN95	27
3.4.3. Wesentliche Resultate aus LHN95	28
3.4.4. Unterschiede zwischen LHN95 und LN02	32
3.4.5. LHN95: aktueller Stand und Ausblick	34
3.5. Unterschiede zu den Nachbarländern	35
4. Das internationale Höhenreferenzsystem	37



4.1.	Definition des internationalen Höhenreferenzsystems	37
4.2.	Gezeitsysteme (<i>Tidal systems</i>)	37
4.3.	Andere Konventionen/Übereinkommen im Zusammenhang mit dem Geoid	37
5.	Das europäische Höhenreferenzsystem	39
5.1.	Vorgeschichte	39
5.2.	Die ersten Rahmen (UELN-55 und UELN-73/86)	39
5.3.	UELN 95/98, EVRS2000	41
5.4.	EVRF2007	41
5.5.	EVRF2019	43
5.6.	EUVN/EUVN-DA	45
5.7.	Die europäischen Geoidmodelle	46
6.	Nationale Höhenreferenzsysteme	49
6.1.	USA	49
6.1.1.	Hintergrund	49
6.1.2.	Erneuerung der Höhenangaben	50
6.1.3.	Theoretische Aspekte	50
6.1.4.	Komponenten	51
6.1.5.	Problematik des steigenden Meeresspiegels	52
6.1.6.	Daten	52
6.1.7.	Transformation von Höhenangaben	54
6.1.8.	Dissemination	54
6.1.9.	Aktualisierungen	55
6.2.	Norwegen	56
6.2.1.	Angleichung an die europäischen Rahmenwerke	56
6.2.2.	Historischer Rahmen	56
6.2.3.	Der Baltische Nivellementring (BLR2000)	56
6.2.4.	Theoretische Grundlagen für die Erstellung von NN2000	57
6.2.5.	Nivellementmessungen	57
6.2.6.	Gravimetrische Messungen	58
6.2.7.	Das Gezeitsystem	58
6.2.8.	Dissemination	58
6.2.9.	Übergang zum neuen Rahmen	59
6.3.	Deutschland	60
6.3.1.	Geschichtliche Entwicklung	60
6.3.2.	Deutsches Haupthöhennetz DHHN2016	62
6.4.	Frankreich	67
6.4.1.	Geschichtliche Entwicklung	67
6.4.2.	Quasigeoidmodelle / Höhentransformation	69
6.4.3.	Der Beitrag Frankreichs an UELN	69
6.5.	Österreich	70
6.5.1.	Das offizielle Höhensystem	70
6.5.2.	Orthometrische Höhen, Normalhöhen	70
6.5.3.	Transformtionen, Geoid	71



6.6.	Italien	71
6.6.1.	Geschichtliche Entwicklung	71
6.6.2.	Aufbau von GE42	72
6.6.3.	Erneuerung des Netzes	73
6.6.4.	Geoidmodelle	73
6.6.5.	Beitrag Italien an UELN	74
6.7.	Neuseeland	74
6.7.1.	Das ursprüngliche System	74
6.7.2.	NZVD2009	75
6.7.3.	NZVD2016	76
6.8.	Schweden	78
6.8.1.	Definition des Höhenbezugssystems	78
6.8.2.	Messungen und Anpassung von RH2000	79
6.8.3.	Quasigeoidmodell	79
6.8.4.	Implementierung des neuen Systems RH2000 (Status 2006)	79
6.9.	Zusammenfassung	80
7.	Schlussfolgerungen	81
7.1.	Das Schweizer Höhenreferenzsystem	81
7.2.	Europäische und globale Höhenreferenzsysteme	81
7.3.	Internationaler Vergleich	81
8.	Empfehlungen	83
	Bibliografie	85
	Abbildungsverzeichnis	87
	Tabellenliste	89
	Abkürzungen	91





1. Einleitung

Das offizielle, in der Schweiz geltende Höhensystem ist LN02 (für «Landesnivellement Netz 1902»). Dieses über 100 Jahre alte System ist ein sogenanntes Gebrauchshöhensystem. Bei der Berechnung der Höhen wurden die Auswirkungen des Schwerefelds nicht berücksichtigt. Das Ergebnis sind Höhen, die nicht eindeutig sind und von der beim Nivellieren verwendeten Wegführung abhängen.

Über ein Jahrhundert lang stützte man sich in der Schweiz zur Verbreitung von Höhendaten auf LN02 und lieferte zuverlässige und relativ genaue Höhenangaben für die Benutzerinnen und Benutzer, insbesondere in der amtlichen Vermessung. Heute, mit dem Aufkommen von globalen Messmethoden wie GNSS¹, werden die Mängel des Systems immer offensichtlicher.

Diese Ausgangslage hat zum Projekt «Einführung eines neuen Höhenbezugsrahmens in der amtlichen Vermessung» geführt, das aus Mitteln der Nationalen Geodaten-Infrastruktur (NGDI) finanziert wird. Es handelt sich um eine Zusammenarbeit zwischen der *Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)* und swisstopo. swisstopo übernimmt dabei über die Arbeitsgruppe «Höhenbezugssystem und Datenkonversion» die Rolle der nationalen Behörde, die für die Definition und den Unterhalt der Bezugsrahmen verantwortlich ist.

Während das *International Terrestrial Reference System (ITRS)* «de facto» der Standard für planimetrische Referenzsysteme ist, wurde noch kein globales Höhenreferenzsystem entwickelt. In der internationalen geodätischen Gemeinschaft wird die globale Höhenreferenz oft als eine der grössten geodätischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts angesehen. Die Arbeitsgruppe wird daher die internationalen Entwicklungen in diesem Bereich besonders aufmerksam verfolgen, um die Kompatibilität des zukünftigen Schweizer Systems mit allen zukünftigen europäischen oder internationalen Systemen zu gewährleisten.

Der vorliegende Bericht ist eine Analyse des Stands der Technik in Bezug auf Höhenreferenzsysteme. Neben einer Einführung in die Grundlagen werden in einem internationalen Vergleich die in mehreren ausgewählten Ländern geltenden Höhensysteme vorgestellt. Dieser Bericht dient als Grundlage für zukünftige Entscheidungen im Zusammenhang mit dem Schweizer Höhensystem.

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





2. Theoretische Grundlagen der Höhenbestimmung

Die Höhe im geodätischen Sinne hat sowohl eine geometrische als auch eine physikalische Komponente. Höhenarten, bei denen die physikalische Komponente – d. h. das Schwerefeld der Erde – nicht berücksichtigt wird, werden als geometrische Höhen bezeichnet. Physikalische Höhen kombinieren beide Komponenten, die geometrische und die physikalische.

Für allgemeine Erklärungen zur Höhendefinition werden die Leser auf die Standardliteratur verwiesen:

- Vanicek and Krakiwski (1986)
- Moritz and Hofmann-Wellenhof (2006)
- Torge and Müller (2012)

Für das Schweizer Höhensystem verweisen wir die Leser auf:

- Schlatter (2007)
- Schlatter and Marti (2007)

2.1. Geometrische Höhen

Geometrische Höhen zeichnen sich durch eine rein geometrisch definierte Bezugsfläche und eine Höhenmessung senkrecht zu dieser Fläche aus. Im Allgemeinen ist die Bezugsfläche in der Geodäsie ein Rotationsellipsoid.

Die ellipsoidische Höhe $h_{ell}(X_P)$ eines Punktes P ist der Abstand (entlang der Ellipsoidnormalen) von diesem Punkt zum Rotationsellipsoid, z. B. GRS80. X_P ist der Vektor mit den geozentrischen Koordinaten von P , d. h. (X_P, Y_P, Z_P) .

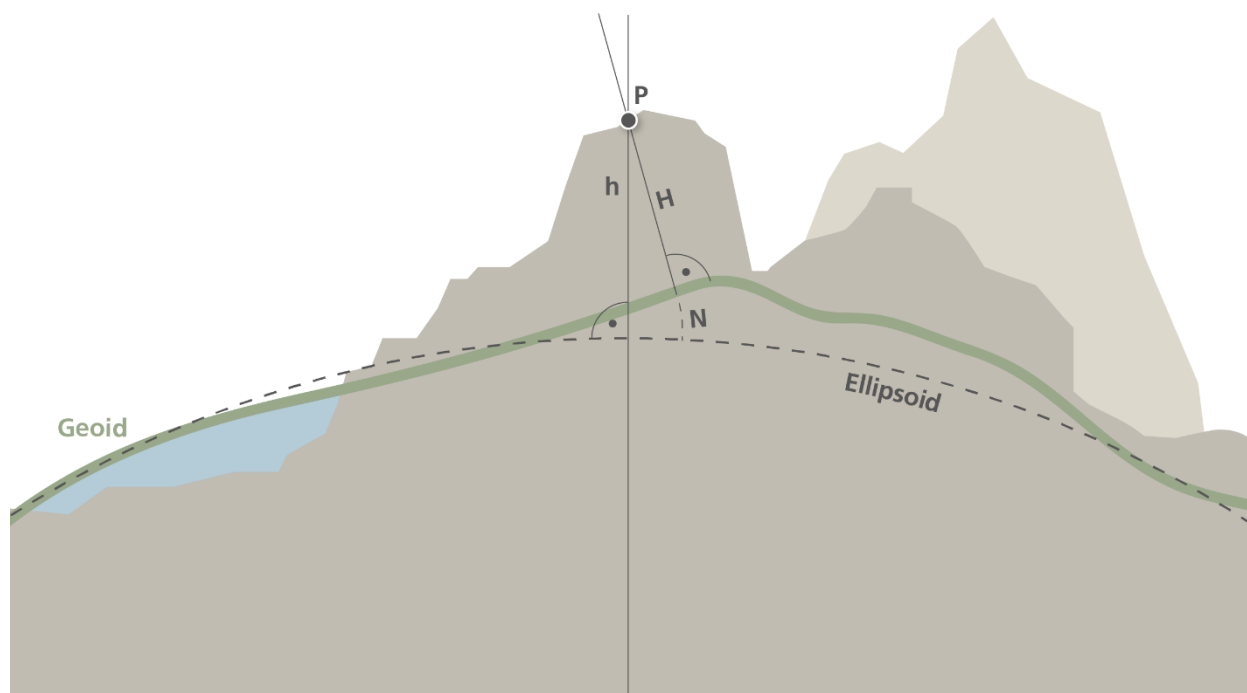


Abbildung. 2-1: Ellipsoidische Höhe h eines Punktes P , orthometrische Höhe H und Geoidundulation N an diesem Punkt.



2.2. Physikalische Höhen

Im Gegensatz zu den geometrischen Höhen werden die physikalischen Höhen alle aus dem Schwerepotential abgeleitet.

2.2.1. Geopotentielle Koten

Die geopotentielle Kote C eines Punktes wird wie folgt berechnet:

$$C(x_p) = W_0 - W(x_p) = \int_{xW_0}^{x_p} g(x) dn \quad (2.1)$$

Mit dem Referenzschwerepotential W_0 , dem Schwerepotential eines Punktes (W) und g der Erdbeschleunigung. Aus den geopotentiellen Koten werden Höhen abgeleitet, indem die geopotentielle Kote durch eine Beschleunigung g_0 dividiert wird:

$$H(x_p) = \frac{C(x_p)}{g_0} \quad (2.2)$$

2.2.2. Arten von physikalischen Höhen

Die Art der gewählten Beschleunigung für g_0 wird die Höhe bedingen, d.h.:

- $g_0 = \gamma_0 = \text{const.}$ für dynamische Höhen H' ,
- $g_0 = \bar{g}$ für orthometrische Höhen H oder
- $g_0 = \bar{\gamma}$ für Normalhöhen H^* .

Dabei ist γ_0 die Normalschwerebeschleunigung an einem ausgewählten Punkt, \bar{g} die mittlere Schwerebeschleunigung entlang der Lotlinie und $\bar{\gamma}$ die mittlere Normalschwere entlang der Ellipsoidennormale durch den Punkt. Aufgrund der fehlenden geometrischen Interpretation haben dynamische Höhen wenig praktische Anwendung. Sie werden manchmal für hydrologische Projekte verwendet, da die Höhenkurven der dynamischen Höhen Äquipotentiale bilden. Moderne Höhensysteme basieren auf orthometrischen Höhen oder Normalhöhen. Im Gegensatz zu Normalhöhen erfordert die Berechnung orthometrischer Höhen aus geopotentiellen Koten Annahmen über die Massen innerhalb der Topografie (oder eine genaue Kenntnis dieser Massen). Dies macht die Berechnung orthometrischer Höhen schwieriger als die Berechnung von Normalhöhen, weshalb letztere in Ländern, die ein strenges Höhensystem eingeführt haben, in der Regel bevorzugt werden. Die genaueste Wiedergabe einer Höhe «über dem Meeresspiegel» wird jedoch mit orthometrischen Höhen erreicht.

2.2.3. Schwerepotential

In der Geodäsie wird das Schwerepotential wie folgt berechnet:

$$W(x) = V(x) + \Phi(x) \quad (2.3)$$

Wobei $V(x)$ das Gravitationspotential aufgrund der Anziehungskraft der Erdmassen, und $\Phi(x)$ das Zentrifugalpotential aufgrund der Erdrotation ist. Der Einfluss der Gezeiten ist in dieser Definition nicht enthalten. Er muss modelliert und von den Messungen abgezogen werden.



2.3. Beziehung zwischen geometrischen und physikalischen Höhen

Zwischen einer ellipsoidischen und einer orthometrischen Höhe besteht folgende Beziehung:

$$h_{ell} - N = H \quad (2.4)$$

Dabei ist N die Geoidundulation und H die orthometrische Höhe. Die Beziehung zwischen einer ellipsoidischen und einer Normalhöhe ist ähnlich:

$$h_{ell} - \zeta = H^* \quad (2.5)$$

Wobei ζ die Höhenanomalie (was der Undulation des Quasigeoids entspricht) und H^* die Normalhöhe bezeichnet.

2.3.1. Geoid

Das Geoid ist die Referenzfläche für die Bestimmung orthometrischer Höhen. Mathematisch ausgedrückt ist das Geoid als die Fläche definiert, die von allen P-Punkten gebildet wird, für die gilt:

$$W(x_P) = W_0 \quad (2.6)$$

2.3.2. Quasigeoid

Das Quasigeoid ist die Referenzfläche für die Bestimmung Normalhöhen. Im Gegensatz zum Geoid hat das Quasigeoid keine physikalische Bedeutung. Es kann über das Telluroid definiert werden. Das Telluroid ist die Fläche, die von allen Punkten Q gebildet wird, für die gilt:

$$U(x_Q) = W(x_S) \quad (2.7)$$

Dabei entspricht U dem Normalpotential und x_S einem Punkt auf der Erdoberfläche. Mit anderen Worten: Das Telluroid wird von allen Punkten gebildet, die ein Normalpotential aufweisen, das gleich dem Schwerpotential an der Oberfläche ist (siehe Abbildung. 2-2). Der vertikale Abstand zwischen dem Telluroid und der Erdoberfläche ist gleich der Höhenanomalie. Die Höhenanomalien, vom Ellipsoid aus abgetragen, bilden das Quasigeoid.

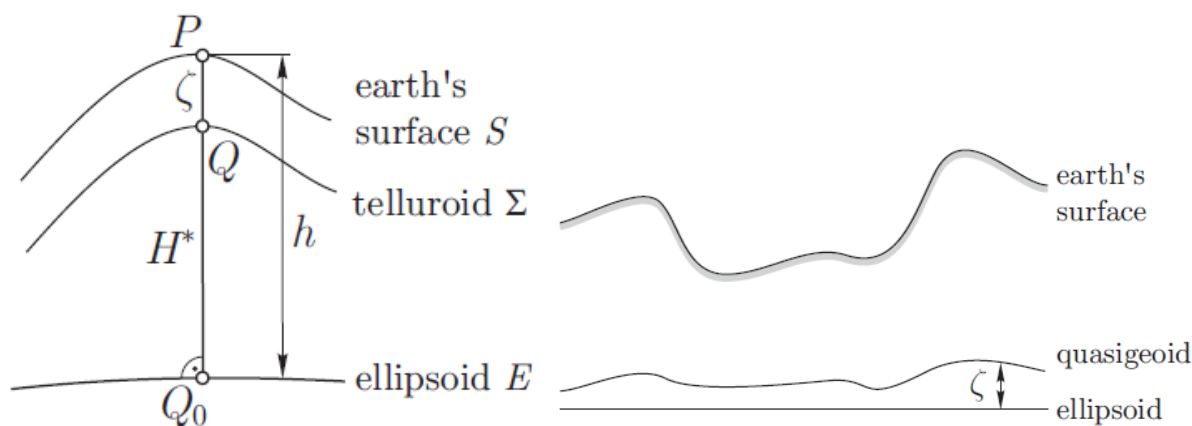


Abbildung. 2-2: Beziehung zwischen Oberfläche, Telluroid und Ellipsoid (links) und zwischen Oberfläche, Quasigeoid und Ellipsoid (rechts). Quelle: Moritz and Hofmann-Wellenhopf (2006).



2.4. Anforderungen an ein Höhensystem

An ein Höhensystem können verschiedene theoretische und praktische Anforderungen gestellt werden. Schlatter (2007) schlägt mehrere Kriterien vor, um die Eignung einer Höhe zur Erfüllung der Anforderungen an ein nationales Höhensystem zu messen. Vier Eigenschaften sind zentral:

1. Jeder Punkt besitzt eine eindeutige Höhe, sei er auf, über oder unter der Erde.
2. Die Höhe eines Punktes spiegelt die potenzielle Energie der Schwerkraft wider. Mit anderen Worten: Zwischen zwei Punkten mit gleicher Höhe fliesst kein Wasser.
3. Die Höhe stellt eine vertikale Distanz dar und hat einen Bezug zum Meeresspiegel.
4. Die Korrekturen, die bei Nivellementmessungen vorgenommen werden müssen, sind lokal (bei kurzen Strecken) vernachlässigbar.

Der erste Punkt impliziert, dass die Höhe H eines Punktes P nur von den Koordinaten des Punktes abhängt und nicht von anderen Parametern, zum Beispiel vom Verlauf der Nivellementlinie:

$$H(P) = f(x_P) \quad (2.8)$$

Dabei ist x_P die Koordinate des Punktes P und f ist eine Funktion, die die geometrischen Koordinaten eines Punktes mit seiner Höhe verbindet. Die Gebrauchshöhen sind ein Beispiel für Höhen, die die erste Bedingung nicht erfüllen, weil:

$$H_{\text{gebrauch}}(P) = f(x_P, \mathcal{S}) \quad (2.9)$$

Wobei \mathcal{S} der Weg ist, der gewählt wurde, um die Höhe vom Referenzpunkt aus zu bestimmen.

Der zweite Punkt ist eine praktische Anforderung. Damit ein Höhensystem bei Infrastrukturprojekten und bei der Untersuchung von Umweltphänomenen nützlich ist, muss es die Richtung, in die das Wasser fliesst, zumindest lokal darstellen. So fliesst das Wasser nicht zwischen zwei Punkten mit gleicher Höhe. In physikalischer Hinsicht bedeutet dies, dass sich die Höhe eines Punktes aus seinem Schwerepotential ergibt, was ellipsoidische Höhen ausschliesst.

Der dritte Punkt ist für Fragen der Akzeptanz und Interpretation unerlässlich. So würde ein Höhensystem, das ausschliesslich auf geopotentiellen Höhenangaben basiert, zwar die Bedingungen 1 und 2 erfüllen, die gängige Interpretation von Höhenangaben wäre jedoch äusserst schwierig. Es ist nicht denkbar, Höhen auf nationalen Karten in Form von Potentialen anzugeben. Ausserdem muss die natürliche Bezugsfläche in der Nähe des Meeresspiegels liegen. Historisch gesehen diente der durchschnittliche Meeresspiegel von Jever als Bezugspunkt.

Die vierte Bedingung wird ebenfalls durch die Praxis auferlegt. Ein Höhensystem, das die Korrektur von lokalen Nivellementmessungen erfordert, ist in der Praxis nicht verwendbar. So muss eine klassische Baustelle nivelliert werden können, ohne dass Höhenkorrekturen an den Rohmessungen vorgenommen werden müssen.

2.5. Kinematik

Eine physikalische Höhe ist definiert als die geopotentielle Kote $C(x_P)$ eines Punktes x_P geteilt durch eine Beschleunigung g_0 :

$$H(x_P) = \frac{C(x_P)}{g_0} \quad (2.10)$$



Nun können sich sowohl die Koordinaten des Punktes (also seine geometrische Höhe) als auch die geopotentielle Kote und die Beschleunigung (ausser bei dynamischen Höhen) im Laufe der Zeit ändern. Daraus folgt:

$$H(x_p, t) = \frac{c(x_p(t), t)}{g_0(t)} \quad (2.11)$$

Die zeitliche Änderung von x_p führt zu einer zeitlichen Änderung der ellipsoidischen Höhe, während die Änderung der geopotentiellen Kote und der Beschleunigung zu einer zeitlichen Veränderung des Geoids und damit der Geoidundulation führt. Das heisst:

$$h_{ell}(t) + N(t) = H(t) \quad (2.12)$$

In der Regel werden die Höhen also eine Geschwindigkeit haben, ebenso wie die geopotentiellen Koten und das Geoidmodell eine zeitliche Komponente haben.

2.6. Gezeiten

Die Behandlung von Gezeiten ist einer der bei der Definition eines Höhensystems berücksichtigten Aspekte. Im Allgemeinen werden drei Systeme betrachtet (s. Tabelle 2-1):

- **Tide-Free (oder non-tidal)** – Bei einer sogenannten «Tide-Free»-Grösse werden alle Gezeiten-einflüsse rechnerisch entfernt, so als ob Mond, Sonne und andere Planeten nicht existierten. Dieses System kann niemals in der Realität beobachtet werden.
- **Mean-Tide** – Eine «Mean-Tide»-Grösse wird um die periodischen Effekte reduziert, enthält aber den permanenten Effekt von Sonne und Mond. Für die Erdkruste ist dies die «Mean-Tide». «Mean-Tide» beschreibt die Bewegungen der Gewässer und den Gang der Uhren. Dieses System bereitet jedoch Probleme bei der Bestimmung des Geoids, da die Auswirkungen der Massen ausserhalb des Erdkörpers noch enthalten sind.
- **Zero-Tide** – Eine sogenannte «Zero-Tide»-Grösse enthält nur die indirekten Effekte, die durch die Verformung der Erde durch Gezeiten entstehen, während alle direkten Effekte (direkte Anziehung von Sonne und Mond) entfernt wurden. Diese Zwischenlösung löst die Probleme bei der Bestimmung des Geoids.

Tabelle 2-1 : Gezeitemsysteme

System	Direkte Dauerwirkung	Indirekte Verformungen
Mean-Tide	enthalten	enthalten
Zero-Tide	entfernt	enthalten
Tide-Free (non-tidal)	entfernt	entfernt

Für die Erdkruste sind die Systeme Zero-Tide und Mean-Tide identisch. Bezüglich Schwerfeld würde das Zero-Tide-System dem Tide-Free-System entsprechen, wenn die Erde vollkommen starr wäre. Anders ausgedrückt: Für das Schwerfeld ist das Zero-Tide-System identisch mit dem Tide-Free-System – mit dem Unterschied, dass im ersten Fall eine deformierte Erde vorausgesetzt wird.

Der Einfluss auf die Höhenbestimmung wird ausführlich diskutiert in *Ekman (1979)*, *Ekman (1989)* oder *Ekman (1996)*.



2.6.1. Verwendung von Gezeitensystemen

Für ozeanografische Studien, Nivellementmessungen und andere Zwecke der Umweltüberwachung bietet sich ganz natürlich ein Mean-Tide-System an. Eine strenge Berechnung des Geoids ist jedoch in diesem System aufgrund des nichtharmonischen Feldes² nicht möglich.

Leider sind in der Geodäsie alle drei Gezeitensysteme in Gebrauch, obwohl in der IAG-Resolution Nr. 13 von 1983 Zero-Tide für das Potentialfeld und Mean-Tide (was für Koordinaten äquivalent zu Zero-Tide ist) für 3D-Koordinaten festgelegt wurde. ITRS und somit auch ETRS89 liefern aber dennoch 3D-Koordinaten im Tide-Free-System. Bei globalen Schwerefeldmodellen trifft man ebenfalls alle Gezeitensysteme an. Für die Höhenbestimmung werden ebenso alle drei Systeme verwendet. Ohne Korrektur liegen die Resultate implizit im Mean-Tide-System vor. Falls man die klassische Luni-Solar-Korrektur anbringt, so landet man im Tide-Free-System. Zero-Tide-Höhenetze sind erst kürzlich in Schweden (2005) und Finnland (2007) eingeführt worden (*Saaranen et al., 2007; Svensson et al., 2006*).

Auch ein globales Referenzellipsoid hängt vom Gezeitensystem ab (grosse Halbachse und Abplattung). Für das aktuelle globale Ellipsoid GRS80 (und somit auch WGS84) wurde aber gar nie festgelegt, auf welches System es sich bezieht. Implizit ist es Tide-Free.

Das europäische Höhensystem EVRS ist als Zero-Tide definiert. Die Input-Daten wurden aber bis zur Lösung «EVRF2000» nie entsprechend korrigiert. Deshalb sind die EVRF-Rahmen bis zu diesem Zeitpunkt eine Mischung aus verschiedenen Gezeitensystemen. Ab der Lösung EVRF2007 wird konsequent in Zero-Tide gearbeitet. Ab der Lösung EVRF2019 werden die Höhen zusätzlich auch in Mean-Tide publiziert.

2.6.2. Umrechnung zwischen Gezeitensystemen

Das Referenzellipsoid wird durch das gewählte Gezeitensystem beeinflusst. Sein Äquatorialradius und seine Abplattung sollten daher je nach gewähltem System variieren. Wenn das Ellipsoid rein geometrisch betrachtet wird, können die Unterschiede zwischen den Gezeitensystemen als Geoiddifferenzen nachgezeichnet und als Kugelflächenfunktionen (*Spherical Harmonics*) parametrisiert werden.

Die EVRF-Konventionen sehen eine für Normalhöhen gültige Transformation vor, die den Term zweiter Ordnung (Ihde et al., 2008, formule 5-5) einschliesst:

$$H_{zt}^* - H_{mt}^* = 0.09940 - 0.29541 \sin^2 \varphi - 0.00042 \sin^4 \varphi \quad (2.13)$$

Wobei φ die geodätische Breite ist. Für die Schweiz variiert diese Korrektur fast linear von -0.063 m im Süden bis -0.052 m im Norden (siehe Abbildung 2-3).

² Im Sinne einer harmonischen Funktion. Eine Funktion ist dann harmonisch, wenn sie die Laplace-Gleichung $\Delta f = 0$ erfüllt.

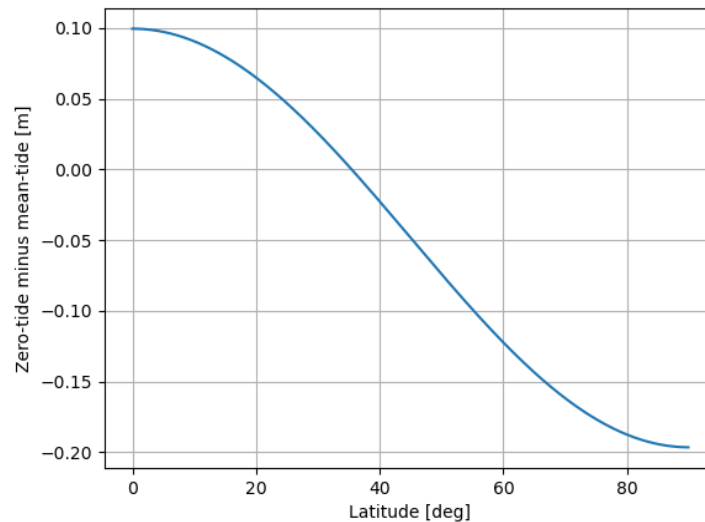


Abbildung 2-3: Unterschied zwischen einer normalen Mean-Tide-Höhe und einer normalen Zero-Tide-Höhe nach den EVRF-Konventionen.

2.7. Definition eines Höhenbezugssystems

Zusammenfassend umfasst die Definition eines Höhenbezugssystems folgende Elemente:

- Wahl des Referenzpotentials
- W_0 ;
- die Art der Höhen, z. B. normale oder orthometrische Höhen;
- das Gezeitensystem;
- Einbezug oder Auslassung eines kinematischen Modells;
- Kriterien für die Erstellung eines neuen Rahmens (z. B. Toleranz, ab der ein neuer Rahmen erstellt wird).

2.8. Umwandlungen zwischen Höhensystemen

Per Definition und für ein strenges System reicht allein die Potentialdifferenz zwischen einem Punkt und dem Geoid aus, um die geopotentielle Kote dieses Punktes zu bestimmen:

$$C(x_P) = W_0 - W(x_P) = \int_{x_{W_0}}^{x_P} g(x) dn \quad (2.14)$$

Das gewählte geodätische Bezugssystem hat keinen Einfluss auf das Ergebnis, da:

$$C(x_P') = W_0 - W(x_P') = \int_{x_{W_0}'}^{x_P'} g(x') dn = \int_{x_{W_0}}^{x_P} g(x) dn \quad (2.15)$$

Wobei x_P' den Koordinaten von P in einem anderen geodätischen Bezugssystem entspricht. Es ist jedoch entscheidend, die untere Integrationsgrenze, x_{W_0}' , anzupassen. Die Umwandlung zwischen zwei Höhensystemen A und B, die ein unterschiedliches W_0 haben, erfolgt mit Hilfe des einzigen Parameters ΔW_0^{AB} .



$$C^A(x'_p) = W_0^A - W(x'_p) = C^B(x_p) - \Delta W_0^{AB} = W_0^B - W(x_p) - \Delta W_0^{AB} \quad (2.16)$$

$$\Delta W_0^{AB} = \Delta W_0^B - \Delta W_0^A \quad (2.17)$$

Die Potentialdifferenz der Geoide – ΔW_0^{AB} – ist daher ein notwendiger und ausreichender Transformationsparameter zwischen zwei Systemen oder zwei Höhenreferenzrahmen.

Bei nicht strengen Systemen kann eine Transformationsfläche vom Typ *Height Reference Surface (HREF)* erforderlich sein. Die Umwandlung ist dann nicht streng und in ihrer Genauigkeit durch die Qualität der Interpolation der HREF begrenzt.

2.8.1. Besonderheiten von lokalen Höhenbezugssystemen

Für ein lokales (resp. regionales) Höhenbezugssystem ist es denkbar, die Höhenunterschiede zwischen zwei Systemen oder Rahmen durch eine geschickte Wahl von W_0 zu minimieren. Daher ist ein unterschiedlicher W_0 für die verschiedenen Höhenreferenzrahmen desselben Höhenreferenzsystems eine lohnende Wahl.

2.9. Techniken zur Höhenbestimmung

Zur Durchführung von Höhenbestimmungen steht eine Vielzahl von Techniken zur Verfügung. Traditionell ist das Nivellement, begleitet von gravimetrischen Messungen, die am häufigsten verwendete Methode. In jüngerer Zeit sind gravimetrische Geoide in Kombination mit einer Höhenbestimmung ausschliesslich über GNSS aufgetaucht.

2.9.1. Geometrisches Nivellement

Beim geometrischen Nivellement werden Unterschiede zwischen Gebrauchshöhen bestimmt:

$$H_{B,gebrauch} = H_{A,gebrauch} + \sum_A^B \Delta h_{nivellement} \quad (2.18)$$

Um Potentialunterschiede zu erhalten, muss die Schwerkraft entlang des Nivellementwegs berücksichtigt werden:

$$C(x_B) = C(x_A) + \sum_A^B g_{\text{surface}} \Delta h \quad (2.19)$$

Wobei C die geopotentielle Kote des betreffenden Punktes ist. Das Präzisionsnivellement erfordert eine Schweremessung alle 1 bis 2 km in alpinen Regionen, gegenüber einer Messung alle 5 km bis 10 km im Flachland (Torge & Müller, 2012).

Das Nivellement weist eine sehr hohe lokale Genauigkeit auf (0,4 mm pro km Doppelnivellement); allerdings werden die Messungen häufig durch langwellige Systematiken unbekannter Herkunft beeinträchtigt. Darüber hinaus ist das Nivellement kostspielig in Bezug auf die Personalressourcen. Die Kosten sind direkt proportional zur Länge des Weges.

2.9.2. Geoidmodell und GNSS

GNSS liefert ellipsoidische Höhenangaben. Mithilfe der Gleichungen 2.4 und 2.5 kann eine ellipsoidische Höhe in eine physikalische Höhe umgewandelt werden. Typischerweise haben lokale Geoidmodelle eine



Genauigkeit von wenigen Zentimetern, was diese Modelle zum limitierenden Faktor bei der Höhenbestimmung macht, zumindest bei statischen GNSS-Messungen. Der Vorteil dieser Methode ist die grosse Genauigkeit (insbesondere bei langen Wellenlängen). Ein lokales Geoid mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, kann jedoch schwierig sein und erfordert eine Vielzahl von gravimetrischen oder astronomischen Messungen (Lotabweichungen).

2.9.3. Trigonometrisches Nivellement

Die Anwendung des trigonometrischen Nivellements wird hauptsächlich durch die atmosphärische Refraktion (Lichtbrechung) eingeschränkt. Gleichzeitige gegenseitige Messungen eliminieren Fehler erster Ordnung; sie sind jedoch schwierig durchzuführen. Bei der Bestimmung von Höhenbezugsrahmen beschränkt sich das trigonometrische Nivellement auf bestimmte Sonderfälle – wie etwa das Überqueren von Flüssen oder Fjorden.

Die Lotabweichungen müssen berücksichtigt werden, um strenge Höhenunterschiede zu erhalten. Ohne Korrekturen ergeben sich Gebrauchshöhen, die von der Wegführung und der Lage der Stationen entlang der Wegführung abhängen.

2.9.4. Barometrisches Nivellement

Diese in der Vergangenheit weit verbreitete Methode findet in der Geodäsie keine Anwendung mehr.

2.9.5. Chronographisches Nivellement

Gemäss der allgemeinen Relativitätstheorie erfahren zwei Uhren, die zwei unterschiedlichen Gravitationspotentialen $V(x_A)$ und $V(x_B)$ ausgesetzt sind, folgende gravitative Rotverschiebung (*Grotti et al., 2018*):

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{V(x_B) - V(x_A)}{c^2} \quad (2.20)$$

So entspricht eine relative Genauigkeit von 10^{-18} in Bezug auf die Frequenzen $0,1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ Potentialdifferenz, was einem Höhenunterschied von 10 mm entspricht.

Die grössten Hindernisse für diese Art von Messungen sind die Fähigkeit, einen ausreichend genauen Uhrenvergleich über grosse Entfernungen durchzuführen, sowie die Entwicklung ausreichend genauer transportabler Uhren. Derzeit noch auf einzelne Experimente beschränkt, ist es wahrscheinlich, dass das chronographische Nivellement in Zukunft eine grössere Rolle bei der Verbindung nationaler Höhensysteme spielt.

2.9.6. Hydrostatisches Nivellement

Das hydrostatische Nivellement erzeugt sehr genaue Höhenunterschiede in einem begrenzten Bereich (einige hundert Meter). Aus diesem Grund kann das hydrostatische Nivellement nicht wesentlich zur Erstellung eines Referenzrahmens beitragen.

2.10. Definition der Genauigkeit

Unter Berücksichtigung der n Punkte x_i und bei Kenntnis der wahren Höhe jedes Punktes $\tilde{H}(x_i)$ und seiner geschätzten Höhe $\hat{H}(x_i)$, wird der Residuenvektor v wie folgt definiert:



$$v_i = \hat{H}(x_i) - \check{H}(x_i) \quad (2.21)$$

Nützlich sind dabei mehrere Indikatoren über die Genauigkeit eines Höhenbezugsrahmens:

- Das maximale Residuum $v_{max} = \max|v|$, wobei die Funktion max den maximalen Wert eines Vektors liefert; die Quadratwurzel des Mittelwerts der Residuen (oder *root mean square*, RMS)

$$RMS_v = \sqrt{\frac{1}{n} v^T v}.$$

Diese skalaren Grössen widerspiegeln leider nicht die räumliche Korrelation zwischen den Residuen. Die Techniken zur Höhenbestimmung führen aber oft zu einer räumlichen Korrelation der Residuen. Diese Unzulänglichkeit kann durch die Semivarianz geschlossen werden. Dieser Genauigkeitsindikator ist wie folgt definiert:

$$\hat{\gamma}(d \pm \delta) = \frac{1}{2n} \sum_{(i,j) \in (d-\delta < \|x_i - x_j\| \leq d+\delta)} |v(x_i) - v(x_j)|^2 \quad (2.22)$$

$\hat{\gamma}(d \pm \delta)$ ist die Semivarianz der Punktpaare in einem Abstand von $d - \delta$ bis $d + \delta$, während n für die Anzahl Punkte in dieser Gruppe steht, und v das Residuum am Punkt x ist. Diese Darstellung der Genauigkeit ermöglicht es, eine Genauigkeit mit einer Wellenlänge zu verknüpfen. So wird die Genauigkeit des Referenzrahmens für eine Wellenlänge λ definiert durch $\hat{\gamma}(\lambda \pm \delta)$.

2.11. Verwendung von Höhen in der Praxis

Die Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über praktische Fälle der Verwendung von Höhen. Während GNSS den Zugang zum Höhensystem über ein Geoid- oder Quasigeoidmodell ermöglicht, benötigen terrestrische Methoden Produkte, die aus dem Schwerefeld abgeleitet sind.

Für lokale Anwendungen mit niedrigen Genauigkeitsanforderungen und sehr örtliche Nutzungen ist keine Korrektur erforderlich, gemäss den Anforderungen in Kapitel 0.

Andere, nicht aufgeführte Anwendungsfälle können auf einen der hier dargestellten Fälle zurückgeführt werden.



Tabelle 2-2: Praktische Anwendungsfälle von Höhenangaben sowie erforderliche Produkte.

	Messungsart	Erwünschte Genauigkeit	Beispiel	Notwendiges Produkt
1.1	Nivellement	mm	Technisches Nivellement für eine Baustelle	Keine Korrektur notwendig
1.2	Nivellement, langer Weg	mm	Hochpräzises Nivellement für eine grosse Baustelle	Orthometrische oder normale Korrektur
1.3	Nivellement	mm - cm	Nivellement für Erdarbeiten	Keine Korrektur notwendig
2.1	Trigonometrische Messungen	mm	Höhenübertragung durch gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkel-messungen	Abweichungen von der Vertikalen an der Oberfläche
2.2	Trigonometrische Messungen	mm - cm	Trigonometrische Messungen mit gleichzeitig-gegenseitige Zenit-winkelmessungen	Keine Korrektur notwendig
2.3	Trigonometrische Messungen	cm	Trigonometrische Messungen für eine Baustelle	Keine Korrektur notwendig
3.1	GNSS	mm - cm	Statische GNSS-Messungen für eine grosse Baustelle	Hochpräzises Geoid- oder Quasigeoid-Modell
3.2	GNSS	cm	RTK/GNSS-Messungen für eine Baustelle	Hochpräzises Geoid- oder Quasigeoid-Modell
3.3	GNSS	dm	Topographische Erhebung	Geoid- oder Quasigeoidmodell mit mittlerer Genauigkeit

2.11.1. Zukünftige Entwicklung der Fallbeispiele

Mit Fortschritten bei der GNSS-Positionierung und der globalen Geoidbestimmung ist es denkbar, dass die oben genannten Fallbeispiele 3.2 und 3.3 durch Low-Cost-GNSS und globale Geoidmodelle für die breite Öffentlichkeit zugänglich werden. Im Allgemeinen tendieren globale Messmethoden wie *Precise Point Positioning* (PPP) dazu, genauer zu werden und Marktanteile zu gewinnen, während regionale Methoden wie RTK mit virtuellen Referenzstationen an Bedeutung verlieren. Daher wird die Kompatibilität eines geodätischen Bezugssystems mit den übergeordneten Rahmen an Bedeutung gewinnen, ebenso wie Transformationen zwischen Bezugssystemen.





3. Das Höhenreferenzsystem Schweiz

Die nachfolgenden Unterkapitel sind im Wesentlichen Zusammenfassungen aus *Schlatter (2007)* und *Schlatter and Marti (2007)*. In diesen beiden Dokumenten wurden hauptsächlich die Arbeiten an dem neuen Landeshöhennetz LHN95 umfangreich und abschliessend dokumentiert.

3.1. Präzisionsnivellement der Schweizerischen Geodätischen Kommission (1864 – 91)

Die ersten Bemühungen zur Bestimmung präziser Höhen auf nationaler Ebene wurden ab 1864 unter der Leitung der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) unter dem Titel «Nivellement de Précision» (NdP) unternommen. Das wichtigste Ergebnis dieser Arbeiten, der «Catalogue des Hauteurs» (CdH), wurde 1891 veröffentlicht. Er enthält die Höhen über dem «Repère Pierre du Niton» (RPN) aller Höhenfixpunkte 1. und 2. Ordnung. Die Schweizerische Geodätische Kommission liess die Frage der Referenzhöhe bewusst offen, da sie der Meinung war, dass es Aufgabe einer Internationalen Geodätischen Kommission sei, diese festzulegen.

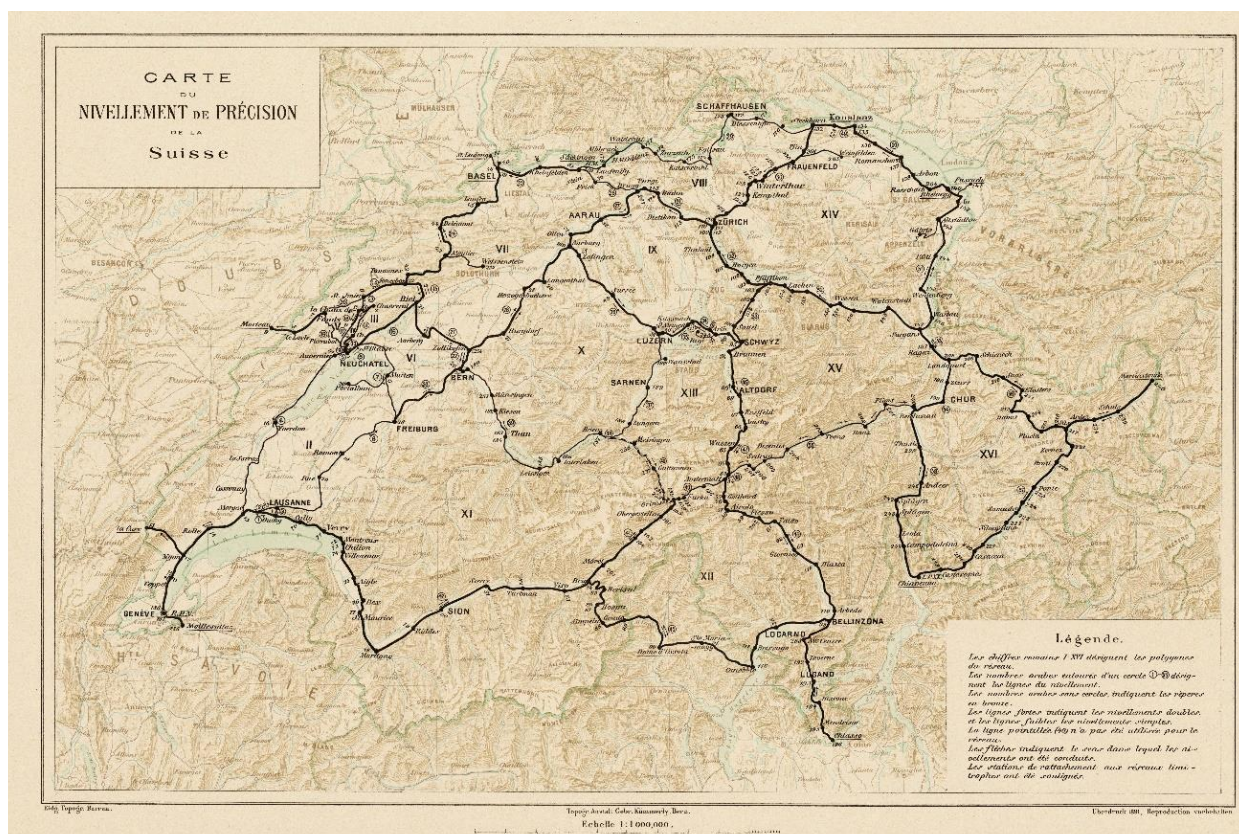


Abbildung 3-1: Präzisionsnivellement der Schweiz (Hirsch & Plantamour, 1891).

3.2. Das Versicherungsnivellement des Eidgenössischen Topographischen Bureau (1893 – 1902)

Nach der Veröffentlichung des «Catalogue des Hauteurs» überliess die SGK die Unterhaltsarbeiten dem damaligen Eidgenössischen Topographischen Bureau, der Vorgängerorganisation des heutigen Bundesamtes für Landestopografie swisstopo. Zwischen 1893 und 1902 führte das Eidgenössische Topographische Bureau ein Versicherungsnivellement durch – zur Erhaltung des sich rasch verschlechternden Netzes von Fixpunkten. 45% der Punkte des Präzisionsnivellements gingen dabei unwiderruflich verloren. Mit dem



Versicherungsnivellement wurden eine neue Art der Materialisierung und neue Messmethoden eingeführt, die bis heute Bestand haben.

Um das Netz der SGK wieder in Stand zu stellen und zu verdichten, wurden zahlreiche und umfangreiche Kontrollnivellements durchgeführt. Wo man innerhalb der Messgenauigkeit der ursprünglichen Nivellements keine Abweichungen feststellte, wurden die Koten des NdP beibehalten. In insgesamt 17 Lieferungen wurden bis im Jahre 1907 die Resultate publiziert. Wie im «Catalogue des Hauteurs» der SGK wurden die Höhen relativ zu RPN ausgewiesen. Allerdings wurde einleitend und an prominenter Stelle auf den 1879 bestimmten, alten Horizont von 376.86 m verwiesen.

3.3. Das Landesnivellement und die offiziellen Gebrauchshöhen der Schweiz LN02

1901 wurde für die geplanten Neutriangulationen und die Neuauflage der Landeskarte die Einführung eines neuen, einheitlichen Projektionssystems und eines geeigneten Horizontes erarbeitet. 1902 veröffentlichte Jakob Hilfiker seine *Untersuchungen der Höhenverhältnisse der Schweiz* (Hilfiker, 1902). Diese Studie war die Basis für den sog. Neuen Horizont 373.6 m für RPN, der bis zum heutigen Tage die gültige und gesetzlich verankerte Horizontfestlegung der Schweiz und die Basis für die sog. Gebrauchshöhen LN02 ist.

Ab 1903 begannen die Arbeiten am Landesnivellement (LN) – und somit am Höhennetz, wie wir es noch heute kennen. Das Hauptnetz mit seinen 18 Polygonen wurde wegen des kriegsbedingten Unterbruchs erst 1927 abgeschlossen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war der Bedarf an Höhenangaben jedoch immer dringender, sodass die Eidgenössische Landestopographie bald beschloss, die Linienmessungen in die Resultate des NdP der SGK und des «Nivellements Repérage» einzuzwängen, auf den neuen Horizont anzuheben und als sogenannte «Provisorische Gebrauchshöhen» ab 1915 laufend zu veröffentlichen. Ebenso hatte die Schweizerische Geodätische Kommission die gravimetrischen Messungen noch nicht abgeschlossen, welche für die Berechnung eines strengen Höhensystems notwendig gewesen wären.

Trotz dieses provisorischen Charakters wurden die Gebrauchshöhen schnell für den Bahn- und Wasserbau und insbesondere für die amtliche Vermessung übernommen. Nach Abschluss der Messungen um 1927 war es dann zu spät; die provisorischen Gebrauchshöhen waren nun schon so weit verbreitet, dass auf die Einführung streng ausgeglichener Höhen als deren definitiver Ersatz verzichtet werden musste. Eine nachträgliche Änderung nach Abschluss des Hauptnetzes wurde dadurch faktisch verunmöglicht. Dies ist der Hauptgrund, dass die Schweiz über einen nicht strengen, auf reinen Nivellementmessungen und den Höhen des 19. Jahrhunderts beruhenden Höhenreferenzrahmen verfügt. Das so gewonnene Netz wird seither regelmässig unterhalten, indem neue Messungen nach wie vor auf den ursprünglichen Höhen abgestützt werden. Lokale Änderungen gegenüber diesen Referenzhöhen werden so zwar berücksichtigt. Die «stabilen» Referenzpunkte haben ihre ursprüngliche Höhe trotz der nachweislichen Alpenhebung seit über 100 Jahren kaum geändert. Dieser Fakt wird in den nachfolgenden Abbildungen dargelegt.

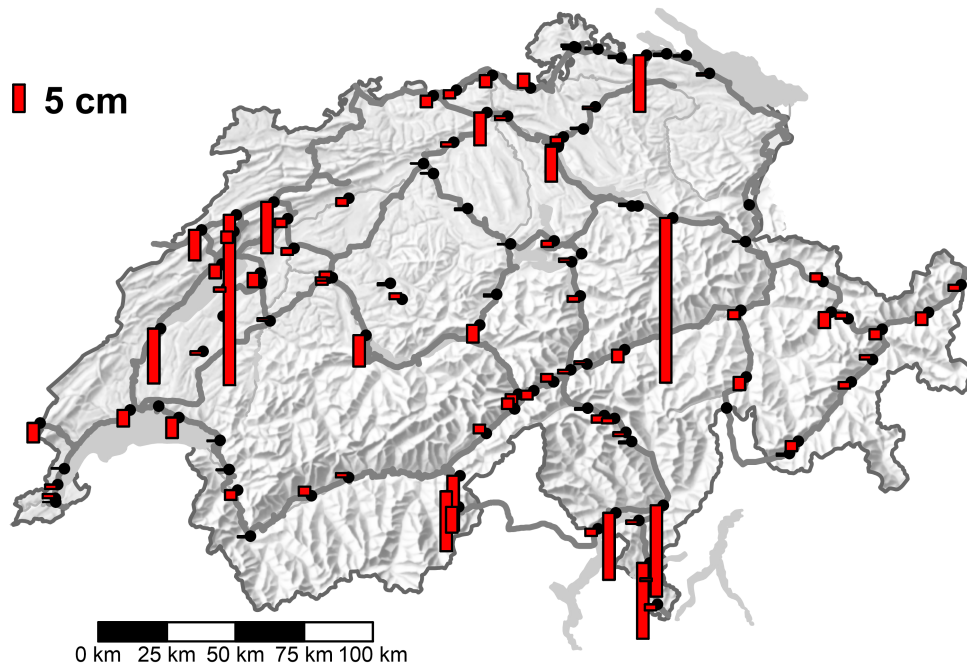


Abbildung 3-2: Differenzen zwischen den Höhen des Catalogue des Hauteurs und des Versicherungsnivellements zu den aktuellen Gebrauchshöhen LN02 der noch bestehenden Fixpunkte 1. Ordnung des Nivellement de Précision Stand 2002 (Schlatter, 2007). Die grossen Balken repräsentieren instabile Punkte.

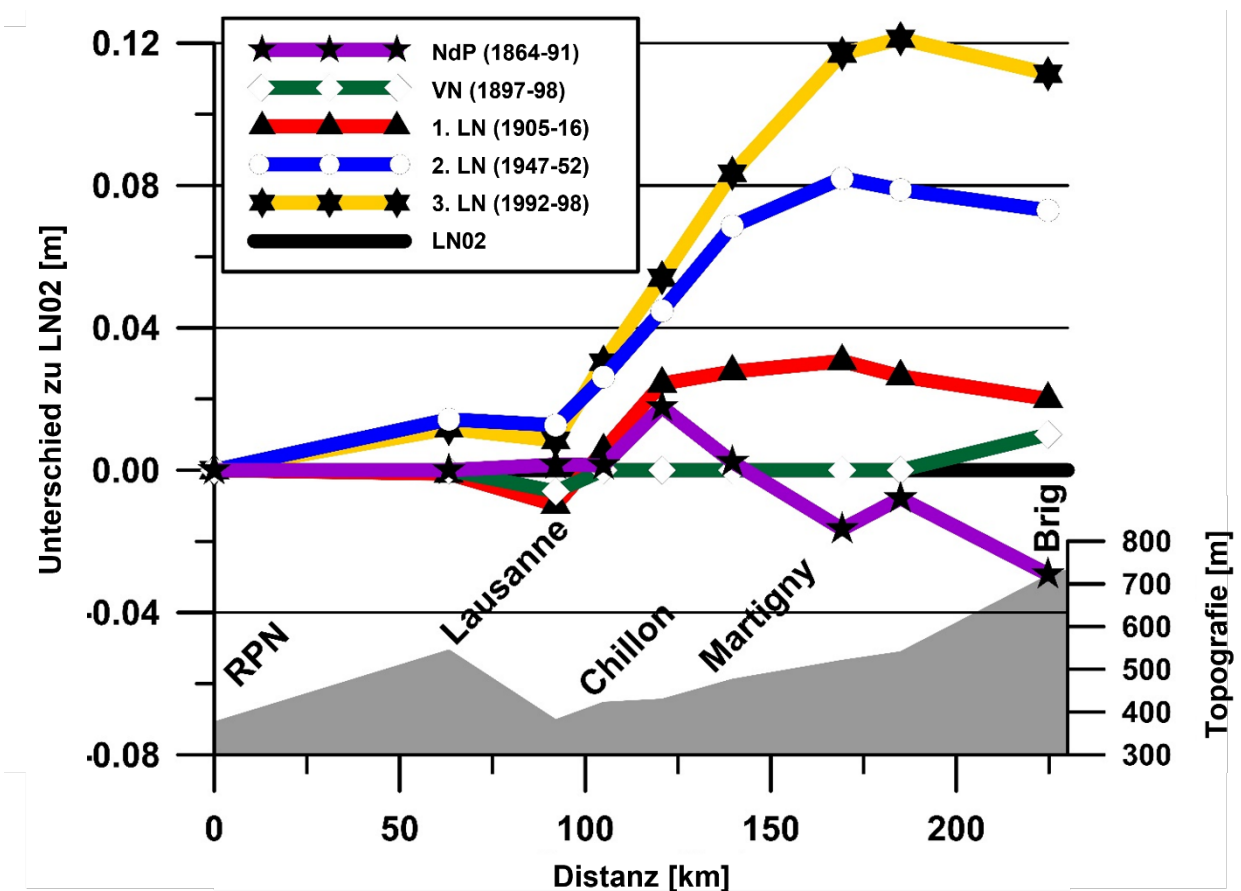


Abbildung 3-3: Vergleich zwischen den offiziellen Gebrauchshöhen LN02, dem Nivellement de précision (NdP), dem Versicherungsnivellement (VN) und den beobachteten Nivellementhöhen entlang der Landesnivellement-(LN)-Linien Genève (RPN) – Martigny – Brig.

3.4. Das nationale Höhenmessnetz 1995 (LHN95)

3.4.1. Vorgeschichte und Systemdefinitionen

Die Erstellung des neuen Landeshöhennetzes LHN95 war ein Teilprojekt der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95. Das Projekt LV95 wurde vom Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) Mitte der 80er-Jahre des vergangenen Jahrhunderts initiiert, um die Landesvermessung den Möglichkeiten der modernen satellitengeodätischen Messmethoden anzupassen und praxistauglich zu gestalten. Mit der Forderung nach der Kompatibilität von GNSS-Höhen mit den Landeshöhen war es unumgänglich, sich mit den strengen, schwerefeldbezogenen Höhenarten auseinanderzusetzen. Satellitengeodätische Methoden liefern geozentrisch-kartesische Koordinaten bzw. mit einem entsprechenden Referenzellipsoid, nebst Länge und Breite sog. ellipsoidische Höhen h als rein geometrisch definierte Grössen. Den direkten Bezug zu den physikalischen (orthometrischen) Höhen H bildet ein präzises Geoidmodell mit den Geoidundulationen N .

Ein Höhensystem gilt als konsistent, wenn die Bedingung

$$h_{ell} = H + N \quad (3.1)$$

erfüllt ist, was mit geeigneten Ansätzen zu einer gemeinsamen Ausgleichung der drei Grössen erreicht werden kann. Erst wenn diese Konsistenzbedingung mit einer entsprechenden Genauigkeit eingehalten ist, können die satellitengeodätischen Methoden für die Bestimmung von absoluten physikalischen Höhen genutzt



werden. Das Projekt LHN95 behandelte somit die Bestimmung der physikalischen Höhen H . Die Einhaltung der Konsistenzbedingung erfolgte anlässlich der Berechnung des neuen Geoidmodells CHGeo2004.

Aufgrund von Vorstudien und der Dissertation von Wirth (1990) fiel die Wahl schon früh auf ein orthometrisches Höhensystem, dies im Gegensatz zu einigen europäischen Ländern, welche bereits über Normalhöhen verfügten. Weitere wichtige Definitionen waren:

- Ausgangshöhe: Potential Fundamentalpunkt Zimmerwald Z0 wird zum Zeitpunkt 1993.0 so festgesetzt, dass RPN im System CH1903+ seine (orthometrische) Höhe 373.600 m beibehält;
- Die Höhen werden zum Zeitpunkt 1993.0 festgehalten, wobei für kinematische Referenz Aarburg $dC/dt = 0.0 \text{ mgpu/a}$ gelten soll.

Bezüglich den Erdgezeiten erfolgten Ende der 1980er-Jahre noch keine Definitionen.

3.4.2. Realisierung des Höhenreferenzrahmens LHN95

Innerhalb des Projektes LV95 wurde LHN95 anfänglich nicht die gleich hohe Priorität beigemessen, wie dies beim damaligen GPS-Landesnetz LV95 der Fall war. Aufgrund der Vorarbeiten von Wirth (1990) wurden 1995 die wesentlichen theoretischen Definitionen auch bezüglich des künftigen Höhensystems in Schneider et al. (1995) publiziert. Mit der praktischen Realisierung des Projektes LHN95 wurde aber erst ab 1996 begonnen. Wesentliche Treiber waren das Bedürfnis nach einem möglichst präzisen Höhenrahmen für die Realisierung der beiden AlpTransit-Basistunnel Lötschberg und Gotthard sowie der Wunsch nach besseren orthometrischen Höhen für die Stützpunkte (GNSS-Nivellement-Punkte) des späteren Geoidmodells CHGeo2004 (Marti, 2016).

Die Realisierung des Höhenreferenzrahmens LHN95 soll aufgrund der damals definierten Teilprojekte kurz erläutert werden:

Tabelle 3-1 : Teilprojekte und ursprüngliche Etappierung des Projekts LHN95 im Jahre 1999 (Schlatter & Marti, 2007).

Teilprojekt	Arbeit	Ausführung
LHN95-LIN	Datenerfassung LN-Linienmessungen und LV95-Anschlussmessungen	bis Ende 2000
LHN95-V	Pilotprojekt Verdichtungsmessungen mit GPS in Zusammenarbeit mit dem Kanton Bern	bis Ende 2000
LHN95-KIN	Kinematische Ausgleichung LHN95; Konsistenz zwischen GPS/Geoid/Nivellement; Berechnung der orthometrischen Höhen aller HFP1	2000 – 2003
LHN95-NF	Erfassung der Nachführungsmessungen	2000 – 2001
LHN95-TrF	Transformation / Übergang zwischen Höhensystemen	2000 – 2002
LHN95-DB	Überführung in Grundlast Landesvermessung, Erstellen einer Datenbank, inkl. Geräte- und Softwarebeschaffung	2001 – 2003

LHN95-LIN/LHN95-NF: Erfassung der Linienmessungen und LV95-Anschlussmessungen / Erfassung der Nachführungsmessungen

Sämtliche, noch nicht digital vorliegenden Haupt- und Sekundärlinien des Landesnivellements wurden vollständig erfasst. Im Wesentlichen fanden die LN-Messungen von 1902 bis ca. 1985 statt. An diesen Arbeiten beteiligte sich auch das Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel (VI-GBT). Ebenso wurden alle LN-Anschlüsse (nivellitisch oder mit GPS) von LV95-Haupt- und Verdichtungspunkten für die Verarbeitung im LHN95 erfasst und dokumentiert. Um für alle HFP1 des LHN95 künftig orthometrische Höhen zur Verfügung stellen zu können, mussten auch die umfangreichen Nachführungsarbeiten entlang den Messlinien



erfasst werden. Dies umfasste jedoch nur die Nachführungen vom Zeitpunkt der jeweils letzten LN-Linienmessungen an.

LHN95-V: Pilotprojekt zur Verdichtungsmessung mit GPS

In Zusammenarbeit mit dem kantonalen Vermessungsamt Bern (heute: Amt für Geoinformation AGI) wurde im Emmental und am Sustenpass untersucht, inwieweit sich GPS als Ersatz für die aufwändigen Nivellementmessungen in HFP2-Netzen einsetzen lässt, und welche Schlüsse sich für die Erstellung und den Unterhalt der künftigen HFP2-Netze ziehen lassen. Dieses Teilprojekt wurde bereits 1997 lanciert und 2000 mit einem Technischen Bericht und einem Fachartikel (*Schlatter et al., 2001*) abgeschlossen.

LHN95-KIN: Kinematische Ausgleichung LHN95

Dieses Teilprojekt bildet den Hauptteil der Arbeiten an LHN95. Die Berechnungsabläufe und deren Ergebnisse sind wesentliche Bestandteile der vorliegenden Dokumentation. Der Abschluss dieses Teilprojektes war ursprünglich für 2003 geplant. Die reine kinematische Ausgleichung mit den Daten des Landesnivellements wäre zu diesem Zeitpunkt auch abgeschlossen gewesen. Es hat sich aber gezeigt, dass für die Erstellung eines konsistenten Höhenrahmens zusammen mit einem neuen Geoidmodell die Datengrundlage noch ungenügend war. Man wartete deshalb die Resultate der Kampagne für die zusätzlichen GPS-Nivellementpunkte (*Schlatter et al., 2005*) und die zweite vollständige Nachmessung des GPS-Landesnetzes LV95 (CHTRF2004) ab. Erst im März 2005 (mit Messdatenbestand bis Ende 2004) wurde das neue Geoidmodell CHGeo2004 – und somit auch der Höhenrahmen LHN95 – veröffentlicht.

LHN95-TrF: Transformation / Übergang zwischen den Höhensystemen

Wichtiges Element des Projektes LHN95 war die Entwicklung der Software *HTRANS* für den Übergang zwischen den beiden Höhenrahmen LHN95 und LN02. Da die amtliche Vermessung im Gebrauchshöhenrahmen LN02 verblieb, ist *HTRANS* nach wie vor ein wesentliches Hilfsmittel für die GNSS-gestützte Höhenbestimmung in der Schweiz.

Das Konzept und die notwendige Software für die Ermittlung und Verwendung dieser Transformationsfläche erstellte Urs Marti (swisstopo). Die Arbeiten konnten erst mit der Veröffentlichung von LHN95 im März 2005 abgeschlossen werden. Die Software steht allen Anwendern gratis zur Verfügung und ist ebenfalls im Swiss Positioning Service swipos integriert.

3.4.3. Wesentliche Resultate aus LHN95

Die nachfolgenden Abbildungen stammen aus Schlatter and Marti (2007). Sie werden hier aufgeführt, da die Ausgangsdaten, die Resultate und Grössenordnungen mit grosser Wahrscheinlichkeit auch bei der Festlegung eines neuen Höhensystems noch relevant sind.

In kinematische Gesamtausgleichung flossen ca. 12 000 km Landesnivellement-Linienmessungen ein, welche in Potentialdifferenzen umgerechnet und auf die Hauptpunkte (ca. 10–15% der bestehenden HFP1) ausgedünnt wurden (vgl. Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Hauptresultate der kinematischen Ausgleichung waren die potentiellen Knoten der HFP1 (zum Zeitpunkt 1993.0), bei Punkten mit wiederholten Messungen, deren zeitlichen Änderungen («Geschwindigkeiten») sowie die aus der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate resultierenden stochastischen Angaben zu diesen beiden Grössen (vgl. Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7). Aus diesen Grössen lässt sich abschätzen, dass eine orthometrische Höhe schweizweit eine Genauigkeit von nicht besser als 1–2 cm aufweist. Die vertikalen Höhenänderungen aufgrund der wiederholten Messungen gegenüber Aarburg weisen Standardabweichungen von bis zu 0,25 mm/Jahr auf (alle Angaben auf dem Signifikanz-Niveau 1σ).

Aufgrund der resultierenden Höhenänderungen (Abbildung 3-7) konnte auch ein Modell generiert werden (CHKLM95, Abbildung 3-9), welches generell notwendig ist, um die geopotentiellen Knoten aller Punkte auf einen definierten Bezugszeitpunkt zu berechnen.

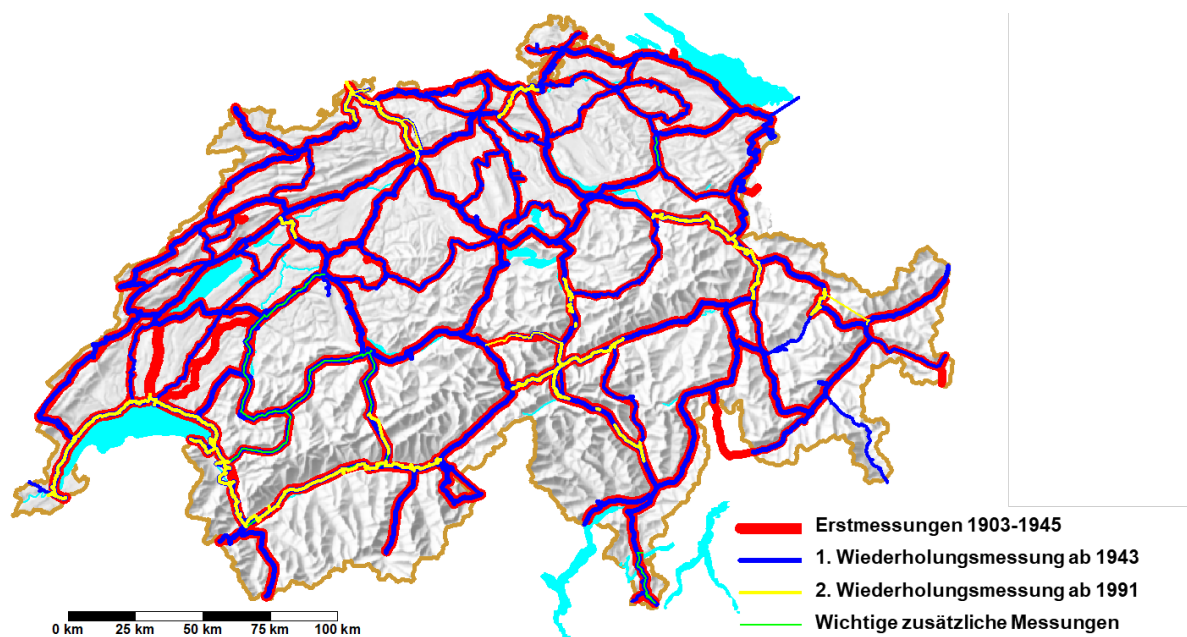


Abbildung 3-4: Die Präzisionsmessungen im schweizerischen Landesnivellement von 1903 – 2004.

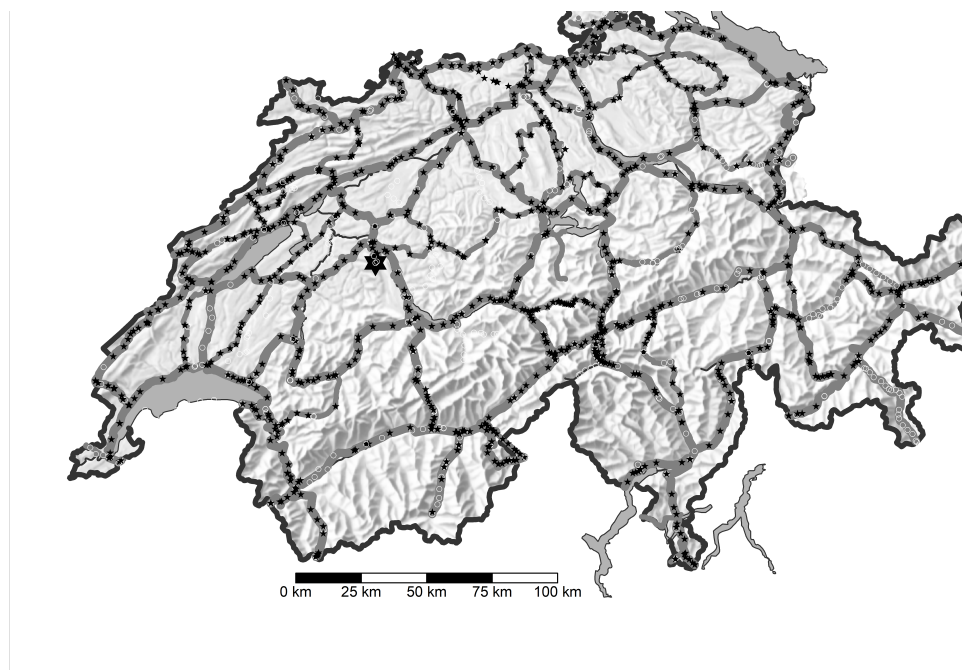


Abbildung 3-5: Übersicht über die Hauptpunkte der kinematischen Ausgleichung (CHVRF04/LHN95).
Grosser Stern: Zimmerwald Z0; kleine Sterne: wiederholt beobachtet; weisse Kreise: nur eine Beobachtung.

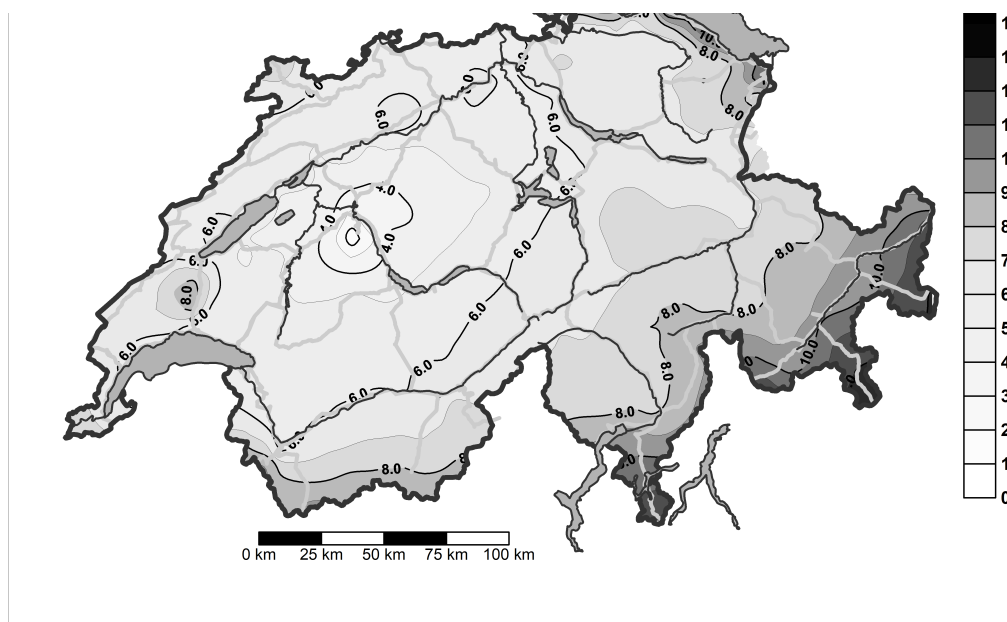


Abbildung 3-6: Die relativen Standardabweichungen der geopotentiellen Koten gegenüber dem Referenzpunkt Zimmerwald [mgpu].

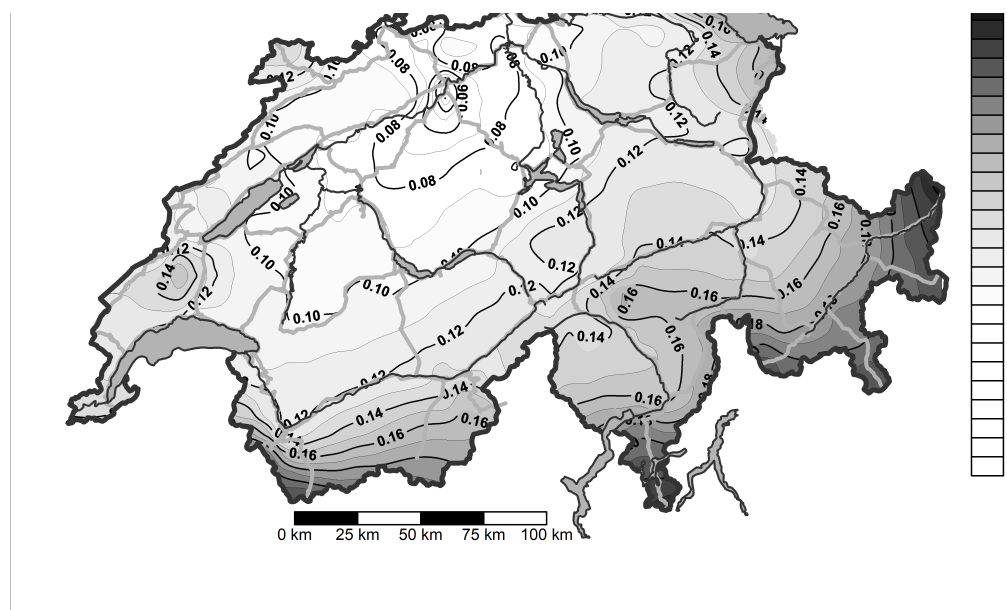


Abbildung 3-7: Die relativen Standardabweichungen der Potentialänderungen gegenüber dem Referenzpunkt Aarburg [mgpu·a⁻¹].

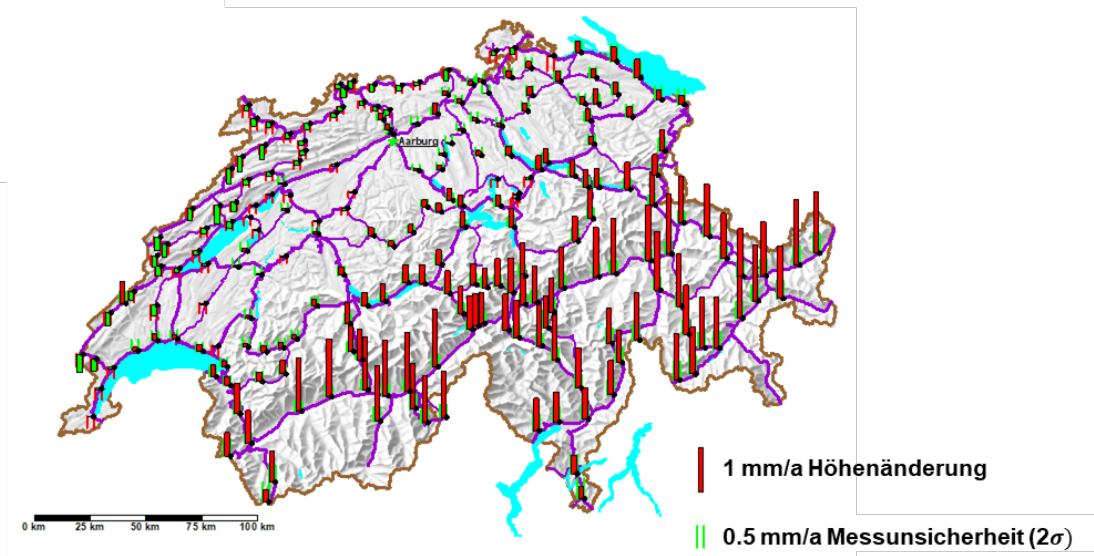


Abbildung 3-8: Rezente vertikale Krustenbewegungen entlang den Linien des Landeshöhennetzes (Stand Ende 2004). Rote Balken: positive Höhenänderungen; grüne Balken: negative Höhenänderungen gegenüber Aarburg [$\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$].

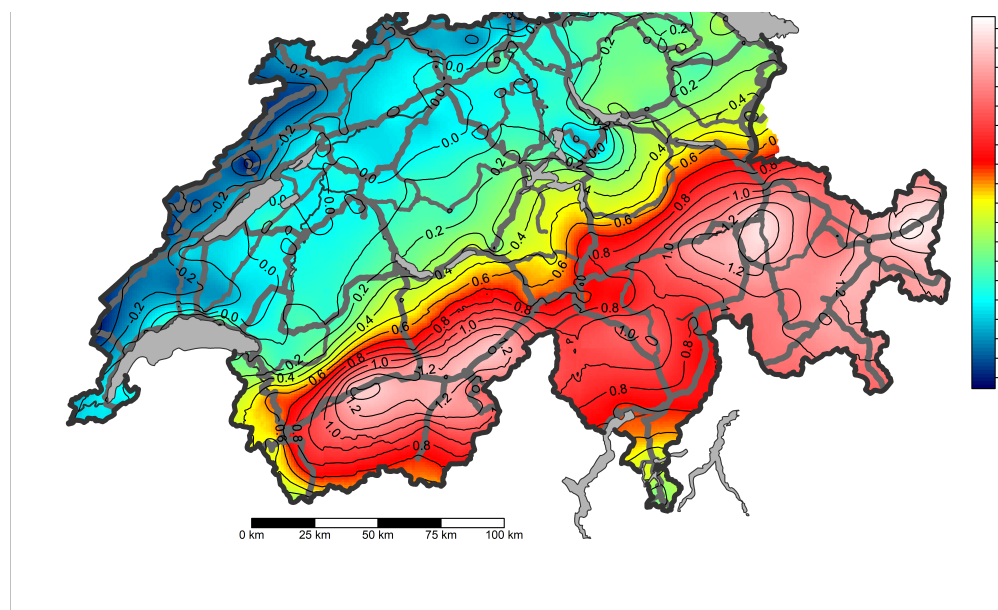


Abbildung 3-9: Das Modell CHKLM95 der Vertikalbewegungen der Schweiz [$\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$].

Die mittlere Schwere entlang der Lotlinie ist die einzige und entscheidende Grösse, um von der geopotentiellen Kote zur orthometrischen Höhe zu gelangen. Wegen der Annahmen zur Massen- und Dichteverteilung im Erdinneren ist sie nicht hypothesenfrei. Die Berechnung dieser Masseneinflüsse ist zudem mit Rechenaufwand verbunden. Beides sind Gründe, welche die Einführung der orthometrischen Höhen in der Praxis noch heutzutage hemmen. Für die Geoid- und Schwerefeldmodellierung wurden an der ETHZ und bei swisstopo im Zusammenhang mit der Geoidberechnung Entwicklungen getätigt, welche diese Rechenschritte wesentlich vereinfachen. Im Gegensatz zur mittleren Normalschwere, die quasi ein theoretisch bestimmbarer Wert ist, weist die mittlere Schwere entlang der Lotlinie eine Messunsicherheit auf und führt in jedem Fall zu einer Reduktion der Genauigkeit der aus den geopotentiellen Koten abgeleiteten orthometrischen Höhen. Simulationen haben die in Abbildung 3-10 dargestellten, höhenabhängigen Fehleranteile an den orthometrischen Höhen aufgrund der mittleren Schwere ergeben. Sie nehmen Beträge von bis zu $\pm 20 \text{ mm}$ an.

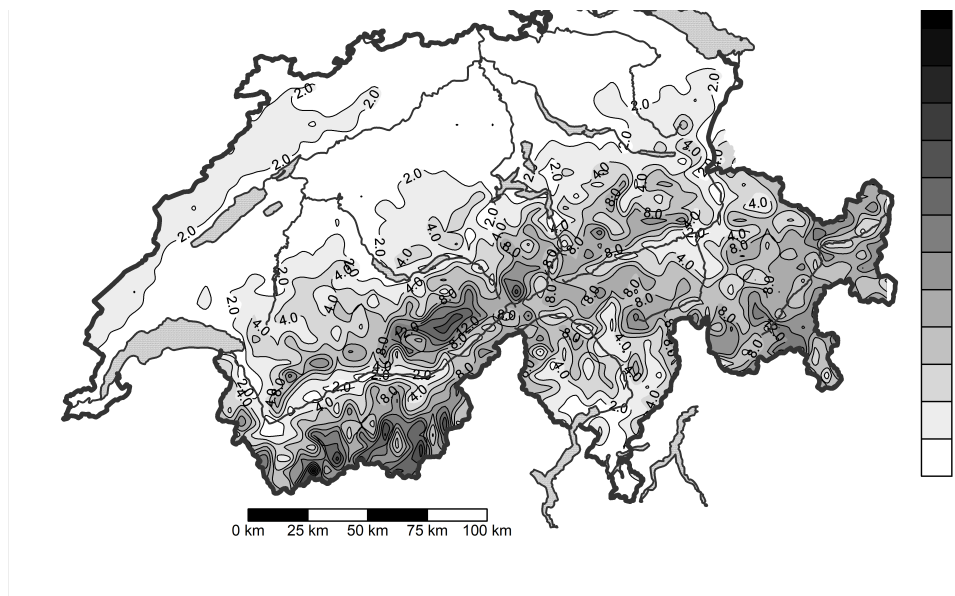


Abbildung 3-10: Fehleranteil der mittleren Schwere an den orthometrischen Höhen [mm].

Auf den Hauptpunkten und den GNSS-Nivellement-Punkten wurden die orthometrischen Höhen berechnet. Auf den Höhenwerten der GNSS-Nivellement-Punkten wurde (zusammen mit den ellipsoidischen Höhen aus CHTRF2004) letztendlich das aktuelle Geoidmodell der Schweiz CHGeo2004 gezwängt gelagert (Marti 2002).

3.4.4. Unterschiede zwischen LHN95 und LN02

Auf den Hauptpunkten der kinematischen Ausgleichung (vgl. Abbildung 3-5) sind die Gebrauchshöhen LN02 bekannt, und es konnten nun Vergleiche zu LHN95 berechnet werden. Zudem lassen sich auf diesen Punkten auch die Unterschiede zu anderen Höhenarten wie Normalhöhen oder dynamischen Höhen simulieren.

Der Unterschied zwischen LHN95 und LN02 ist in Abbildung 3-11 ersichtlich. Betrachtet man die Höhen LHN95 als fehlerfrei, ist der Unterschied im Wesentlichen eine Folge von drei Hauptursachen:

1. Einfluss unterschiedlicher Höhenarten: Der Unterschied zwischen den orthometrischen Höhen und den Gebrauchshöhen, welche verzwängte beobachtete Nivellementhöhen sind, äussert sich in erster Linie in einem Höhenmassstab von ca. 1cm/100 Höhenmeter resp. 100 ppm.
2. Vertikale Höhenänderungen: Diese wurden in LN02 nie berücksichtigt (vgl. Abbildung 3-3) und führen zu entsprechenden Zwängen in der Grössenordnung von bis 10–20 cm.
3. Grundsätzliche Zwänge in den Grundlagen von LN02: Diese sind in erster Linie in den Messunsicherheiten im NdP zu suchen und nehmen Beträge von bis zu 10–20 cm an.

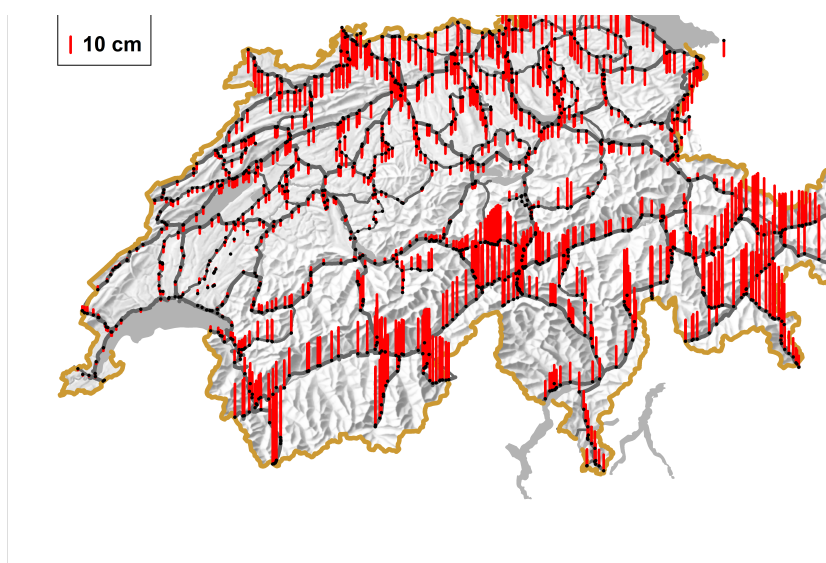


Abbildung 3-11: Die Differenzen zwischen den orthometrischen Höhen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02.

Die Realisierung von *HTRANS*, der Transformationsroutine für die Berechnung der Unterschiede zwischen LHN95 und LN02, basiert im Wesentlichen auf einer Separierung der Unterschiede unter Zuhilfenahme der aus den geopotentiellen Knoten abgeleiteten Normalhöhen:

$$H_{LHN95} - H_{LN02} = (H^* - H_{LN02}) + (H_{LHN95} - H^*) = f(y, x) + g(y, x, H) \quad (3.2)$$

Wobei H^* die Normalhöhe eines Punktes ist. Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 3-12 und Abbildung 3-13) zeigen die beiden Separierungen. Die Höhenabhängigkeit zwischen den Normalhöhen und den orthometrischen Höhen ist deutlich erkennbar:

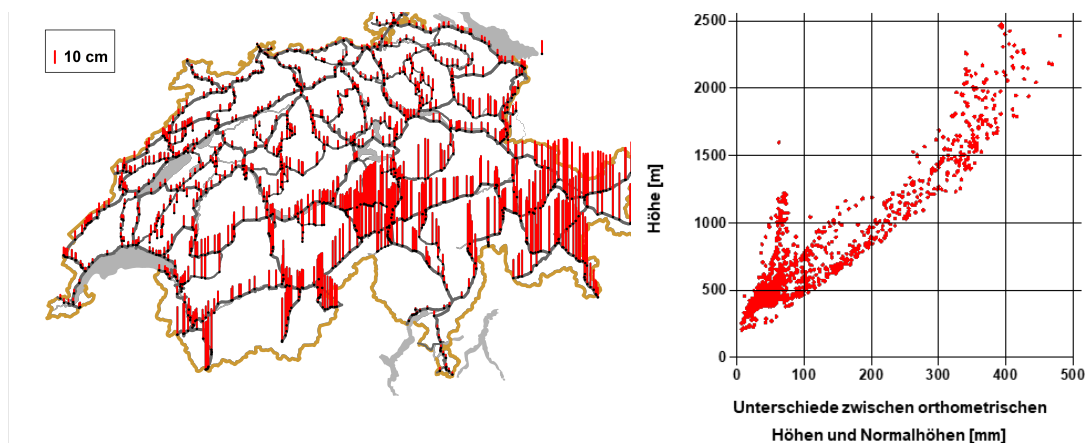


Abbildung 3-12: Unterschied zwischen den orthometrischen Höhen und den Normalhöhen LHN95: rechts Höhen [m] gegenüber Differenzen [mm].

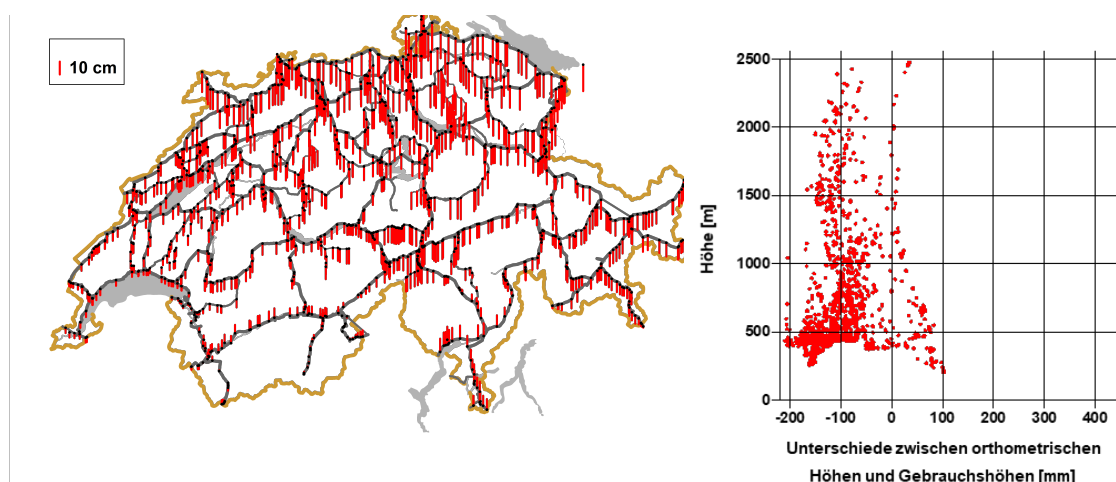


Abbildung 3-13: Unterschied zwischen den Normalhöhen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02: rechts Höhen [m] gegenüber Differenzen [mm].

Letztendlich konnte die Höhenabhängigkeit unter Zuhilfenahme der lokalen Bouguer-Anomalien angenähert, und die verbleibenden Residuen in den Stützpunkten konnten aufgrund einer lageabhängigen Restfläche interpoliert werden. Die vollständige Transformation lässt sich dann folgendermassen darstellen:

$$H_{LHN95} = H_{LN02} + f_{Norm-LN02}(y, x) + f_{rest}(y, x) - \Delta g_{Boug}(y, x) \cdot H \quad (3.3)$$

Die Stützpunkte lassen sich auf diese Weise in mm-Genauigkeit abbilden. Entlang den Nivellementlinien ist daher mit einer sehr guten Interpolationsgenauigkeit zu rechnen. Ausserhalb der Linien ist mit Abweichungen von bis zu 10–20 cm zu rechnen, dies aber vor allem aufgrund der oft unbekannten Herkunft und Genauigkeit der bestehenden LN02-Höhen.

3.4.5. LHN95: aktueller Stand und Ausblick

Im Jahre 2002 wurde der Entscheid gefällt, dass die amtliche Vermessung die Umstellung vom Gebrauchshöhenrahmen LN02 auf LHN95 nicht durchführt (Wicki et al., 2002). Die Hauptgründe, die letztendlich auf einer Vernehmlassung bei den wichtigsten Produzenten und Anwendern von Daten mit Raumbezug beruhte, waren folgende:

- Die Verwechslungsgefahr (zwischen LHN95 und LN02) – und damit die Gefahr von Fehlern mit kostspieligen Konsequenzen – ist sehr hoch, weil die Differenzen zwischen LN02 und LHN95 kaum erkennbar sind³.
- Eine Grosszahl der digitalen Höhendaten sind heute noch nicht bereit für die Transformation, da die dazugehörigen Lagekoordinaten fehlen.
- Viele Höhenkoten werden als Zeitreihen verwendet, ein Wechsel würde zu einem Sprung führen.
- Die Standards zur Einführung eines europäischen Höhensystems sind zurzeit zu wenig gesichert und akzeptiert, sodass Anpassungen nicht ausgeschlossen werden können.
- Die Diskussion und die Vorbereitung betreffend der Lage (Einführung von LV95) sind wesentlich weiter fortgeschritten als bei der Höhe. Eine Verknüpfung von Lage und Höhe könnte sich nachteilig für die bereits beschlossene Umsetzung in der Lage auswirken.

Dass LHN95 eine moderne, zukunftsgerichtete und GNSS-taugliche Ergänzung zum neuen Lagebezugsrahmen LV95 ist, wurde von den Fachkreisen fast ausnahmslos anerkannt. Insbesondere der erfolgreiche

³ Die elegante Art, die neuen Lagekoordinaten (LV95) von den alten (LV03) durch die Definition neuer «false northing»- und «false easting»-Werte zu unterscheiden, ist für die Höhe aus praktischen Gründen nicht möglich.



Einsatz von LHN95 bei der Realisierung der AlpTransit-Tunnel, aber auch die indirekte Verwendung bei der GNSS-Höhenbestimmung über CHGeo2004 und *HTRANS*, beweisen die Notwendigkeit eines modernen Höhenrahmens bis zum heutigen Tag. Obige Punkte, welche nicht alle vermessungstechnischer Natur sind, wurden 2002 jedoch höher gewichtet.

Es zeichnet sich aber jetzt schon ab, dass einige dieser Punkte auch bei der Wahl und allfälligen Einführung eines neuen Höhensystems für die Schweiz zu Diskussionen Anlass geben werden.

Auf eine flächendeckende Berechnung über sämtliche HFP1 wurde bis heute bewusst verzichtet. Die Nachfrage nach streng berechneten Höhen war zudem nie vorhanden. Linienneumessungen im Landeshöhen-netz wurden in kinematische Ausgleichungen einbezogen – vor allem, um die zeitlichen Änderungen der Höhen zu aktualisieren. LHN95-Höhen können auf diese Weise ebenfalls aktualisiert werden. Solange das aktuelle Geoidmodell nicht abgelöst wird, ist aber auch hier kein unmittelbarer Bedarf gegeben.

3.5. Unterschiede zu den Nachbarländern

Als Binnenland – resp. als Land ohne Meerespiegelanschluss – ist es immer wieder von Interesse, welche Horizontunterschiede zu den Nachbarländern bestehen. Als erstes werden die Unterschiede der offiziellen Höhen (CH: LN02; Stand 2021) betrachtet (Abbildung 3-14). Angaben zu den Höhensystemen der Nachbarländer sind in den Kapiteln 6.3 – 6.6 zu finden.



Abbildung 3-14: Differenzen zwischen den offiziellen Höhen der Schweiz und den Nachbarländern (Vorzeichen: CH-Nachbarland) in [cm].

Die Differenzen zu Deutschland bewegen sich zwischen 30 cm und 36 cm, zu Österreich zwischen -1 cm und 7 cm, zu Italien zwischen -20 cm und -33 cm und zu Frankreich zwischen -20 cm und -35 cm. Auch hier sind die Differenzen sicherlich beeinflusst durch unterschiedliche Höhenarten, die Qualität der LN02-Höhen, aber gewiss auch durch die Qualität der Höhen der Nachbarländer.

Bezüglich der unterschiedlichen Höhenarten lässt sich dies gut belegen, wenn man die geopotentiellen Knoten aus LHN95 in Normalhöhen umrechnet und wiederum mit den Nachbarländern vergleicht (Abbildung 3-15).

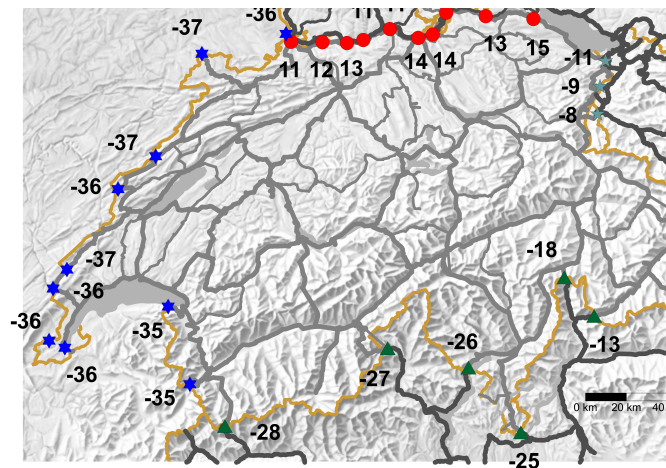


Abbildung 3-15: Differenzen zwischen Schweizer Normalhöhen (aus LHN95) und den offiziellen Höhen der Nachbarländer (Vorzeichen: CH-Nachbarland) in [cm].

Der Umfang der Unterschiede zwischen der Schweiz und Frankreich reduziert sich von 13 cm auf 2 cm. Nun werden eben Normalhöhen CH mit Normalhöhen F verglichen. Auffällig ist aber, dass die länderspezifischen Unterschiede zwischen Frankreich und Deutschland in Basel praktisch unverändert bei ca. 50 cm bestehen bleiben.

Wenn die Nachbarländer keine Anpassung vornehmen, werden auch bei einem neuen Schweizer Höhensystem immer Horizontunterschiede an der Landesgrenze bestehen bleiben.



4. Das internationale Höhenreferenzsystem

Ein mit dem internationalen Höhenreferenzsystem kompatibles Schweizer System wäre nicht nur ein wertvoller Beitrag zu den globalen Bemühungen, sondern auch ein effektiver Weg, um die Fortschritte bei der globalen Geoidbestimmung zu nutzen. Damit würde auch der internationale Austausch von Höhendaten erheblich vereinfacht werden.

In diesem Kapitel werden die wichtigsten theoretischen Grundlagen eingeführt, bevor die dem internationalen Höhenbezugsrahmen zugrunde liegenden Konventionen vorgestellt werden.

4.1. Definition des internationalen Höhenreferenzsystems

Die Definition des internationalen Höhenreferenzsystems (*International Height Reference System, IHRS*) wurde 2015 von der IAG verabschiedet (*International Association of Geodesy, 2015*):

- Die Bezugsfläche für die Höhenangaben ist eine Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes mit einem Potential $W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, was dem Durchschnitts-Meeresspiegel im Jahr 2010 entspricht.
- Die Parameter, Beobachtungen und Daten sind im Gezeitensystem Mean-Tide erfasst.
- Die Längeneinheit ist der Meter (SI), die Zeiteinheit ist die Sekunde (SI).
- Die vertikale Koordinate des Punktes P mit dem Schwerepotential W_P ist seine geopotentielle Kote C_P :

$$C_P = W_0 - W_P \quad (4.1)$$

- Der Raumbezug für die Position von P zur Berechnung seines Potentials $W_P = W(\mathbf{x})$ wird in Koordinaten \mathbf{x} ausgedrückt, die sich auf die ITRF beziehen.

4.2. Gezeitensysteme (*Tidal systems*)

Die IHRS-Realisierungsstrategie empfiehlt eine Berechnung des Geoids im Zero-Tide-System und eine anschliessende Umwandlung der Potentialkoordinaten in das Mean-Tide-System in Anlehnung an die IERS-Konventionen (*Sánchez et al., 2021*).

Die ITRF-Koordinaten werden in einem Tide-Free-System angegeben, das auf der elastischen Reaktion der Erde basiert. In der terrestrischen Gravimetrie und beim Nivellement basiert das Tide-Free-System auf der Annahme, dass sich die Erde im hydrostatischen Gleichgewicht befindet. Der Unterschied zwischen diesen beiden Ansätzen kann Unterschiede von bis zu 0,16 m erzeugen; es werden jedoch keine Empfehlungen für den Umgang mit dieser Art von Fehlern abgegeben. Die Koordinaten sind in das System Mean-Tide (in diesem Fall gleichwertig mit Zero-Tide) umzuwandeln, falls nötig, gemäss der Konvention von *lhde et al. (2008)*.

4.3. Andere Konventionen/Übereinkommen im Zusammenhang mit dem Geoid

Solange von der IAG ausser dem GRS80 kein neues geodätisches Bezugssystem veröffentlicht wird, muss weiterhin GRS80 verwendet werden.

Eine Nullgradkorrektur ist zu verwenden, um den GM-Wert so zu berichtigen, dass er mit der für W_0 gewählten Konvention übereinstimmt (*Sánchez et al., 2021*, Gleichungen. 6, 14 und 15).

Zumindest sind atmosphärische, topografische und ellipsoidische Effekte bei der Bestimmung des Geoids zu korrigieren (in den zitierten Artikeln als Lösung des «*geodetic boundary value problem*» (GBVP) bezeichnet). Bisher wurden die atmosphärischen Effekte auf internationaler Ebene nicht homogen behandelt.



Wenn das GBVP unter Verwendung der Stokes-Theorie gelöst wird (Schätzung des Geoids und nicht des Quasigeoids), muss die Berechnung des Potentials W_P an der Erdoberfläche so durchgeführt werden, dass die Konsistenz mit der Geoidschätzung gewährleistet ist.

Das für IAG-Produkte benutzte *Inventory of Standards and Conventions* (Angermann et al., 2020) nennt einige zusätzliche Standards, die mit dem IHRF in Verbindung stehen:

- der Wert der Gravitationskonstante G
- der Wert von GM , der geozentrischen Gravitationskonstante
- die durchschnittliche Winkelrotationsgeschwindigkeit der Erde
- die durchschnittliche Dichte der Topographie
- Wie sollen Standardunterschiede (z. B. im GM -Wert) zwischen globalen Geoidmodellen und dem IHRF berücksichtigt werden? Bzw. wie soll man diese Begriffe korrigieren?



5. Das europäische Höhenreferenzsystem

5.1. Vorgeschichte

Die ersten Bemühungen zur Definition eines europäischen Höhensystems gehen bereits auf die mittel-europäische Gradmessung zurück. Bereits an deren ersten Sitzung in 1864 wurde beschlossen, die europäischen Pegelstationen untereinander mit Nivellement zu verbinden und einen europäischen Datums-punkt zu definieren. Daraufhin wurde in vielen Ländern nivelliert, und 1889 konnte eine Gesamtausgleichung mit 48 Schleifen und 42 Pegelanschlüssen präsentiert werden. Dabei wurde die normal-orthometrische Korrektur angebracht⁴. Die ausgewiesene Genauigkeit betrug ca. 4–5 mm/km, was Helmert als absolut ungenügend bezeichnete. Auf einen gemeinsamen Datumspunkt konnte man sich nicht einigen.

5.2. Die ersten Rahmen (UELN-55 und UELN-73/86)

Die internationalen Aktivitäten bezüglich einer europäischen Gesamtausgleichung der nationalen Präzisions-Nivellementmessungen mit dem Ziel, einheitliche europäische Meereshöhen zu bestimmen, wurden schon kurz nach dem 2. Weltkrieg wieder aufgenommen. Unter den Namen UELN (United European Levelling Network) oder auch REUN (Réseau Européen Unifié de Nivellement) wurde ab dem Jahre 1955 auf Beschluss der IUGG in Europa begonnen, Nivellement- und Schweremessungen zu sammeln. Zwei Hauptziele wurden damals definiert (*Remmer, 1986*):

- ein gemeinsames europäisches Höhendatum zu definieren und zu realisieren;
- Vergleiche zwischen den mittleren Meereshöhen an verschiedenen Pegeln entlang der europäischen Küste durchzuführen.

Es wurde festgelegt, dass nur ein sehr grobmaschiges Netz ausgeglichen werden sollte, und dass die Berechnung auf geopotentiellen Knoten basieren sollte. Zudem sollte Skandinavien wegen der dortigen Vertikalbewegungen gesondert behandelt werden. Eine erste Lösung für Westeuropa wurde 1963 unter dem Namen UELN-55 präsentiert und das Projekt vorübergehend abgeschlossen. Ähnliche Arbeiten wurden gleichzeitig auch in Osteuropa unter dem Namen Einheitliches Präzisionsnivellementsnetz (EPNN) durchgeführt.

An der 15th General Assembly der IUGG in Moskau im Jahre 1972 war beschlossen worden, ein neues UELN zu etablieren. 1973 hatte die IAG-Subkommission für UELN ihre erste Zusammenkunft; man beschloss deshalb, das neue europäische Nivellementnetz UELN-73 zu benennen. Die Zielsetzung war weitgehend gleich wie 1955, allerdings sollte mit den damals jüngsten, zur Verfügung stehenden Nivellementdaten der einzelnen Länder gearbeitet werden. Datenzentren wurden in München und Delft eingerichtet.

Als Abschluss der Arbeiten am UELN-73-Netz wurde 1986 unter dem Namen UELN-73/86 die definitive Ausgleichung präsentiert (*Ehrnsperger & Kok, 1986*). Insgesamt 14 Länder hatten sich mit Daten im Umfang von 91 750 km Präzisionsnivellement und 774 Punkten beteiligt. Der Beitrag der Schweiz beschränkte sich auf 1315 km Messungen zwischen nur 13 Punkten. Die Länder waren aufgefordert, ihre Messungen in Form von gemessenen Potentialdifferenzen zwischen den Punkten abzuliefern. Hauptresultate waren die ausgeglichenen, geopotentiellen Knotenpunkte und deren mittleren Fehler aus der freien, statischen Ausgleichung gegenüber dem Referenzpunkt im Pegel von Amsterdam (NAP: Normaal Amsterdams Peil).

In *Ehrnsperger and Kok (1986)* und *Remmer (1986)* wurde das Problem der statischen Berechnungen bereits thematisiert. Die fennoskandischen, postglazialen Hebungsphänomene waren bereits bekannt; trotzdem war einzig die Schweiz in der Lage, Daten zu den rezenten Hebungen der Punkte zu liefern. Glücklicherweise wurden die gemeinsamen Grenzanschlüsse von den einzelnen Ländern zum gleichen

⁴ Normal-orthometrische Höhen sind eine besondere Höhenart, die auf die Normalschwere beruht. Normal-orthometrische Höhen sind hauptsächlich von historischem Interesse.



Zeitpunkt gemessen, zumal das Messmaterial aus einem Zeitraum zwischen 1943 und 1976 stammt. Nachträglich hat sich zumindest der Grenzanschluss in Chiasso lokal als sehr instabil erwiesen.

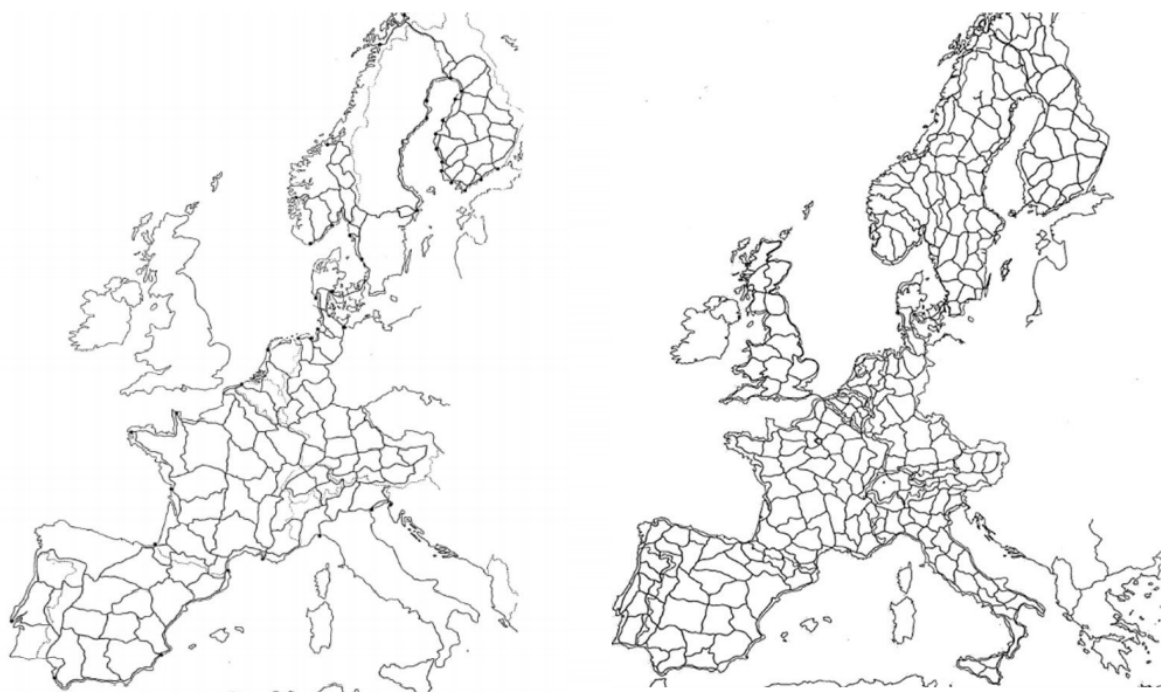


Abbildung 5-1: Netze UELN-55 und UELN-73.

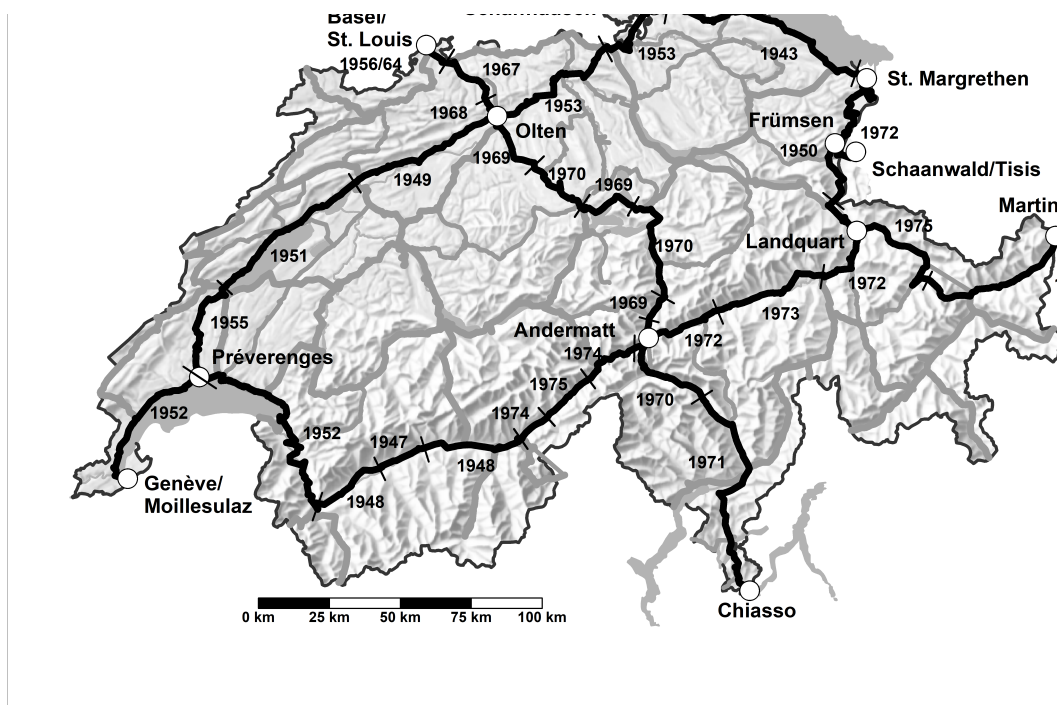


Abbildung 5-2: Die Messungen (schwarze Linien) zum Schweizer Beitrag zu UELN-73/86 und UELN-95/98.



5.3. UELN 95/98, EVRS2000

Nach einem Unterbruch von knapp 10 Jahren wurden die Arbeiten an UELN von der IAG-Subkommission für kontinentale Netze in Europa (EUREF) 1994 wieder aufgegriffen. Der Hauptgrund war eine dringende Anfrage des CERCO (Comité Européen des Responsables de la Cartographie Officielle) an die Technical Working Group (TWG) von EUREF zur Realisierung eines Europäischen Höhensystems mit einer Genauigkeit von 0,1 m. Die Arbeiten wurden unter der Bezeichnung UELN-95 gestartet. Hauptmerkmal der neuen Ausgleichung war die Erweiterung des ursprünglichen Datensatzes mit Messungen aus Zentral- und Osteuropa (Tschechien, Ungarn, Slowenien, Polen, Slowakei, Bosnien, Kroatien, Montenegro, Vojvodina). Zudem lieferten einige Länder (Deutschland, Österreich, Niederlande, Dänemark) neue Datensätze. Der Schweizer Datensatz wurde beibehalten, obwohl auf einzelnen Abschnitten neuere Messungen vorhanden waren. Das Datenzentrum wurde beim BKG in Deutschland eingerichtet. Zudem war unter dem Namen UELN-2000 die Entwicklung eines kinematischen Höhensystems geplant (Ihde & Augath, 2003). Dies führte aber lediglich zu einer lokalen Lösung für Norddeutschland, die Niederlande und Dänemark.

Unter dem Namen UELN-95/98 wurde am EUREF-Symposium 1999 die Lösung präsentiert. Insgesamt wurden von 3063 Knotenpunkten die unbekannten Potentiale berechnet. Die freie Ausgleichung ist wie UELN-73/86 im NAP gelagert. Im Unterschied zu den alten Lösungen wurde die Gewichtung der Beiträge der einzelnen Länder aus einer Varianz-Komponenten-Schätzung erzeugt. Es resultierte eine nachträgliche Standardabweichung von 1,10 mgpu/km (Ihde & Augath, 2003; Sacher et al., 1999). In der Schlusslösung wurden neben geopotentiellen Knoten auch Normalhöhen ausgewiesen. Die Messungen aus Schweden, Norwegen und Finnland wurden auf die Epoche 1960.0 reduziert.

Nach der Publikation von UELN-95/98 wurde die Terminologie geändert. Als UELN wird seither das Messnetz bezeichnet. Für das Höhensystem wird der Begriff European Vertical Reference System 2000 (EVRS2000) eingeführt. Dabei wurde auch erstmals das Zero-Tide-System zur Definition hinzugefügt. Als erster Referenzrahmen wird EVRF2000 präsentiert. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer neuen Ausgleichung des Datensatzes von UELN95-98, welcher noch um die Messungen in den baltischen Staaten und in Rumänien ergänzt wurde. In einem Nachtrag 2003 konnten auch noch die Messungen aus Bulgarien integriert werden. Die Messungen wurden für EVRF2000 noch nicht um die Gezeiteneinflüsse korrigiert, womit EVRF2000 eigentlich weiterhin im Mean-Tide ist (trotz der Definition von EVRS2000 als Zero-Tide-System).

5.4. EVRF2007

Nach der Publikation von EVRF2000 lieferten verschiedene Länder noch neue Messungen. Darunter war 2002 auch die Schweiz, die einen erweiterten und aktuelleren Datensatz an das Rechenzentrum am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) ablieferte. Dieser Datensatz bestand nun praktisch aus allen aktuellsten Linienmessungen des Landesnivellements, und es wurde darauf geachtet, dass sämtliche Schweizer GNSS-Nivellement-Punkte im Datensatz enthalten sind. Die Tatsache, dass der Knotenpunkt in Chiasso instabil ist (Senkung um ca. 4 mm/Jahr), erschwerte aber die Integration dieser Daten. Um die aktuelleren Messungen einführen zu können, musste der Knoten Chiasso für die Berechnungen aufgebrochen werden, sodass keine offizielle UELN-Verbindung zwischen der Schweiz und Italien mehr bestand. Für die Schlusslösung von EVRF2007 wurde auch noch der Knoten in Basel-St.Louis aufgebrochen, sodass auch zu Frankreich nur noch eine minimale Verbindung (in Moillesulaz) bestand. Im Vergleich zu anderen Ländern ist der Datensatz der Schweiz eher umfangreich. Dies erlaubt aber eine ziemlich zuverlässige Transformation zwischen dem europäischen und dem nationalen Höhenrahmen.

In der Schlusslösung von EVRF2007 flossen die Daten aus 27 Ländern ein. Es wurden 7939 Knotenpunkte und 10347 Linien verarbeitet. Für die Lagerung der Lösung wurde nun nicht mehr Amsterdam alleine verwendet, sondern es wurden 13 Datumspunkte eingeführt. Die Ausgleichung blieb aber frei. Die Schlusslösung wurde nur so verschoben, dass auf den Datumspunkten im Mittel keine Differenzen zur Lösung EVRF2000 entstanden. Die Schweiz verzichtete wegen der vorhandenen Vertikalbewegungen bewusst auf einen eigenen Datumspunkt. Zudem wurde in EVRF2007 ein neues Modell des Post-Glacial-Uplift eingeführt (NKG2005LU), welches nun neben Skandinavien auch Dänemark, die baltischen Staaten und Teile Deutschlands und Polens umfasste. Die Messungen in diesen Ländern wurden auf die Epoche 2000.0



reduziert. Die Gezeitenkorrekturen wurden angebracht, womit nun EVRF2007 auch sauber im Zero-Tide-System berechnet werden konnte. Ein Problem war noch, dass der Unterschied zwischen Zero-Tide und Mean-Tide in Amsterdam etwa 8,4 cm betrug. Um die Kompatibilität mit EVRF2000 herzustellen, wurde dieser Offset an der Schlusslösung EVRF2007 noch angebracht.

Nach der von EVRF2007 wurden von EUREF auch erstmals Transformationsparameter zu den nationalen Höhensystemen zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten neben einem generellen Offset auch zwei Verkippungen, was natürlich in einigen Ländern (z.B. der Schweiz) nur eine sehr grobe Annäherung ist.

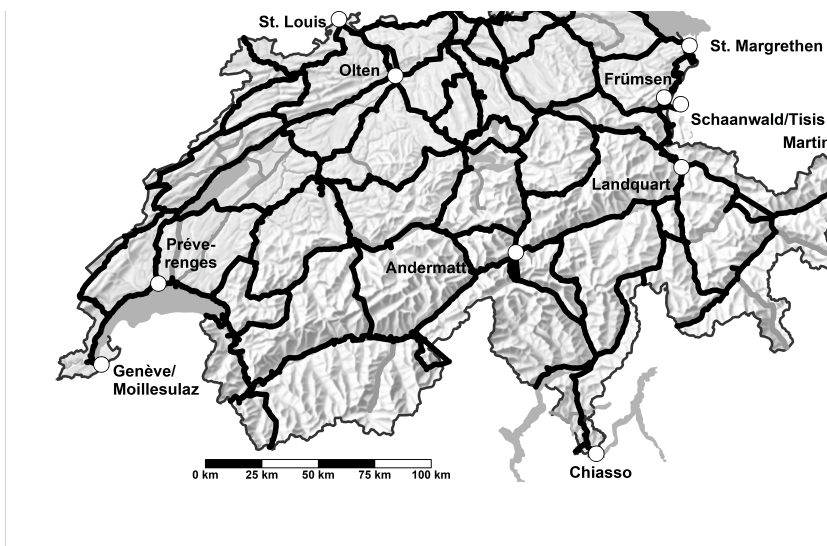


Abbildung 5-3: Erweiterter und aktualisierter Datensatz 2002 der Schweiz (mit den alten UELN-Knotenpunkten). Beitrag für EVRF2007.

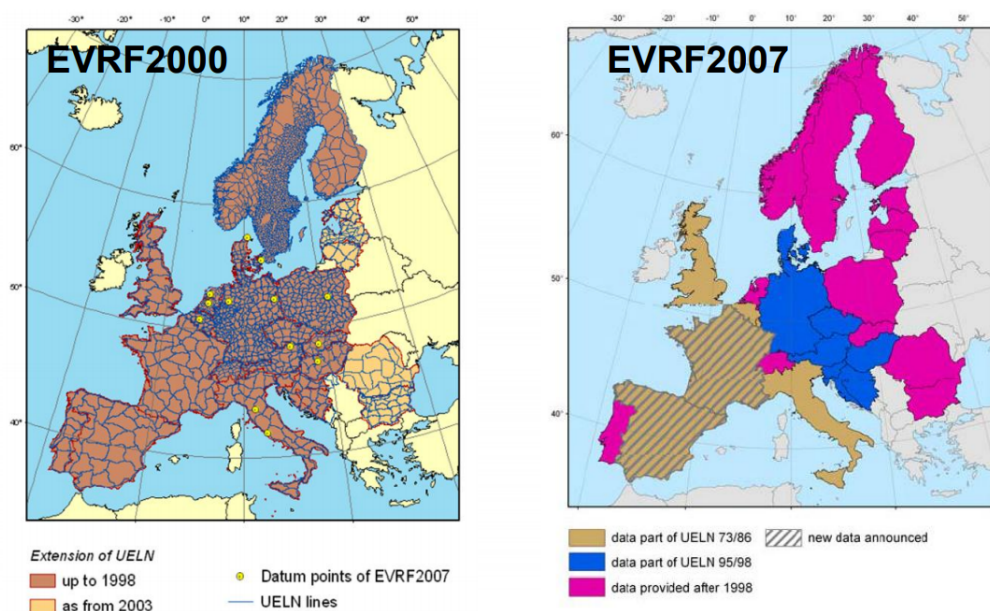


Abbildung 5-4: Übersicht der Datensätze für EVRF2000 und EVRF2007 (Sacher et al., 2008).

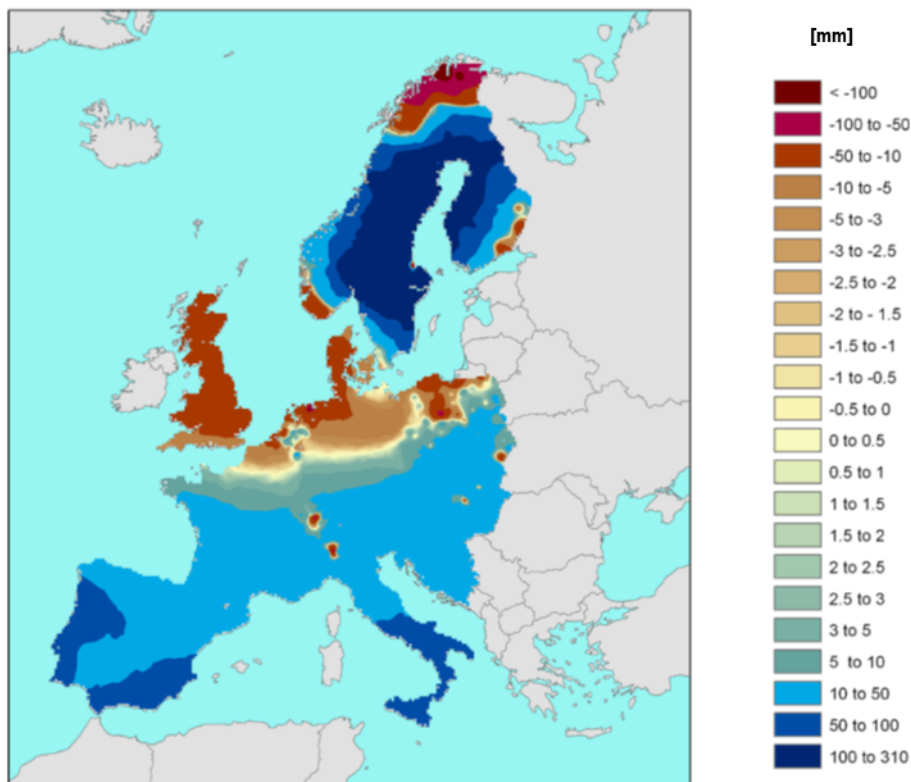


Abbildung 5-5: Differenzen zwischen EVRF2000 und EVRF2007 in mm (Sacher et al., 2008).

5.5. EVRF2019

Nach der Publikation von EVRF2007 lieferten einige Länder (Lettland, Spanien, Deutschland, Estland, Belgien, Tschechien, Slowenien, Bulgarien) Updates ihrer Daten. Als wichtigster neuer Beitrag lieferte Russland 2012 den europäischen Teil seiner Nivellementdaten. Somit konnte die Schleife um die Ostsee geschlossen und Skandinavien besser ins Netz eingebunden werden. Weitere, zusätzlich teilnehmende Länder waren Weissrussland (2017), die Ukraine (2018) und Nord-Mazedonien (2019). Aus Frankreich konnten die Daten des NIREF 2015 integriert werden, wodurch auch die Anbindung von England (Nivellement durch den Eurotunnel; vorher nur hydrostatisches Nivellement) verbessert werden konnte. Besonders wichtig für die Schweiz war der neue Datensatz aus Italien. Dieser erlaubte die Integration von sieben neuen Grenzverbindungen. Die Schweiz lieferte 2015 und 2018 ein Update der Daten mit den aktuellsten Messungen, was insbesondere die Verbindung zu Italien verstärkte.

Für die Lagerung von EVRF2019 wurde wiederum das Konzept der Datumpunkte verwendet. Allerdings wurden jetzt keine Punkte mehr verwendet, welche in Hebungszone oder in unsicher bestimmten Netzteilen liegen. Dies ergab ein Total von 12 Datumpunkten in 12 Ländern.

In Nordeuropa wurde für die Vertikalbewegung das neue Modell NKG2016LU verwendet, und die Beobachtungen wurden auf die Epoche 2000.0 reduziert. Für die Schweiz wurde nun auch erstmals ein Modell der Vertikalbewegungen verwendet. Es handelt sich dabei um die Werte, welche aus der kinematischen Ausgleichung für LHN95 berechnet (resp. interpoliert) wurden. Durch die Verwendung dieses Modells reduzierte sich der mittlere km-Fehler der Schweizer Daten signifikant von 1,09 auf 0,86 mm.

Als Gezeitenmodell wurde für die Berechnung Zero-Tide verwendet. In den publizierten Höhen wurden dieses Mal aber auch die Werte für Mean-Tide angegeben. Die Werte wurden wiederum so verschoben, dass auf der Breite von Amsterdam die beiden Systeme identische Werte liefern.

Die Schlussresultate wurden im November 2019 an die teilnehmenden Länder verschickt. Danach folgte im August 2020 noch ein Update, welches insbesondere eine kleine Kippung der Daten in Polen eliminierte.



Die Differenzen zu EVRF2007 liegen im Bereich von -44 bis +15 cm, was doch ziemlich viel ist. Der Hauptgrund dafür ist die Integration der französischen NIREF-Daten, was in Westeuropa grössere Veränderungen bewirkte. Die Daten von Grossbritannien wurden neu berechnet, was dort gegenüber den früheren Lösungen eine grössere Kippung verursachte. Die grössten positiven Differenzen treten in Italien auf, was eine Folge der neuen italienischen Daten ist.

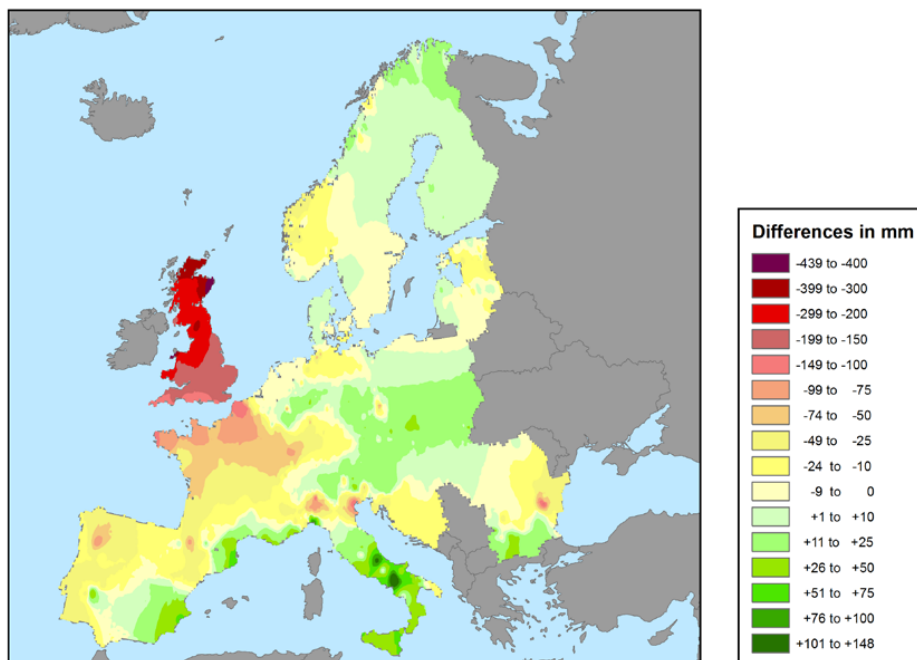


Abbildung 5-6: Differenzen EVRF2019 – EVRF2007 (Sacher & Liebsch, 2019).

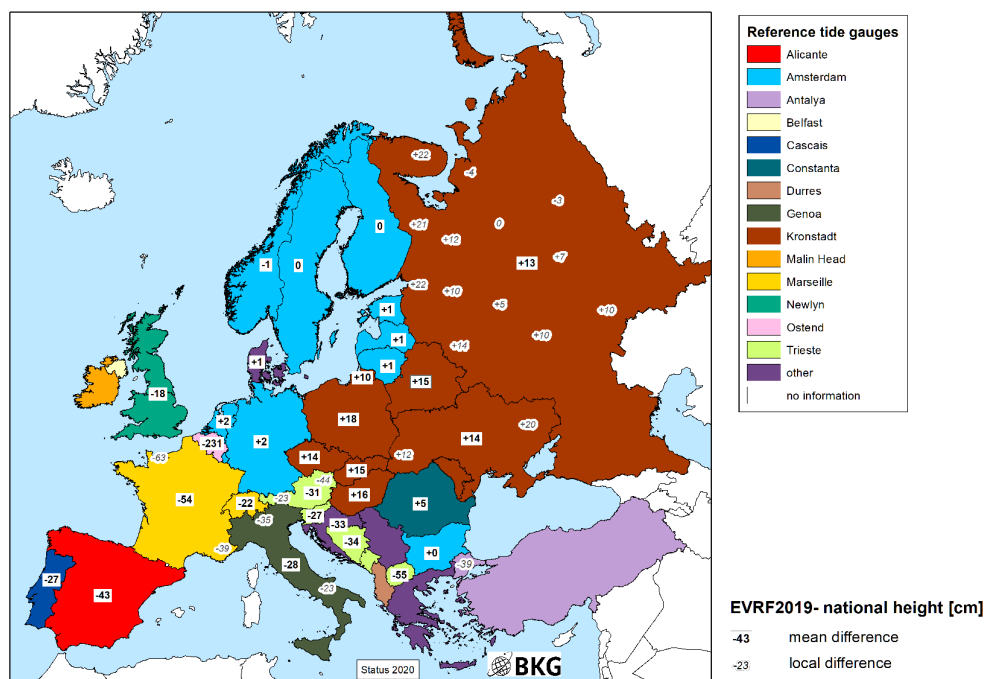


Abbildung 5-7: Mittlere Offsets der nationalen Höhensysteme gegenüber EVRF2019⁵.

⁵ Quelle: <https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/EVRF2019/evrf2019.html>, aufgerufen am 10.11.2022



5.6. EUVN/EUVN-DA

Das Projekt EUVN (European Vertical Reference Network) wurde 1995 von der EUREF mit den praktischen Zielen lanciert, die verschiedenen nationalen Höhendaten mit cm-Genauigkeit zu vereinen – insbesondere auch in Ländern, welche keinen Anschluss an das UELN haben (Ihde et al., 2002). Kernaktivität von EUVN war die Bestimmung von dreidimensionalen Koordinaten in ETRS89 mit GPS auf 196 in Europa verteilten Stationen. Diese Aktion ermöglichte es, die schwerefeldbezogenen Höhen aus dem UELN mit GPS-Höhen zu vergleichen. Darin enthalten waren auch 63 Pegelstationen entlang der europäischen Küsten. Ziel war es auch, diese EUVN-Stationen mittels Nivellement mit den nächstgelegenen UELN-Knoten zu verbinden. Dadurch konnten die Stationen als eigentliche GPS-Nivellement-Punkte im UELN-95-Netz ergänzt werden – und damit zu einer neuen europäischen Geoidbestimmung beitragen. Um diese Daten noch zusätzlich zu verdichten, wurde von EUREF 2003 das Projekt EUVN-DA (EUVN Densification Action) lanciert. Dabei sollte der EUVN-Datensatz verdichtet werden, allerdings nicht mehr durch eine spezielle GPS-Kampagne, sondern nur durch bereits in den Ländern vorhandene Messungen. Dabei kamen bis 2009 insgesamt mehr als 1400 Stationen in 25 Ländern zusammen, die zur Überprüfung europäischer und globaler Geoidmodelle verwendet werden konnten.

Die Schweiz beteiligte sich mit insgesamt acht EUVN-Stationen und weiteren 12 EUVN-DA-Stationen.

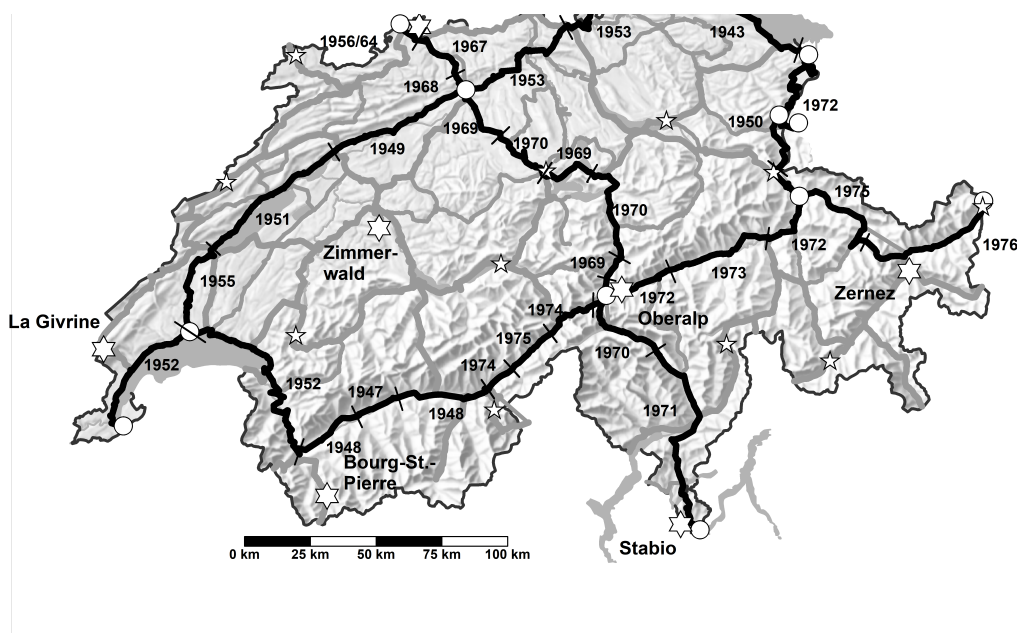


Abbildung 5-8: UELN-73/95-Verbindungen mit dem Schweizer Beitrag zu den EUVN-Punkten (grosse Sterne) sowie zu EUVN-DA (kleine Sterne).

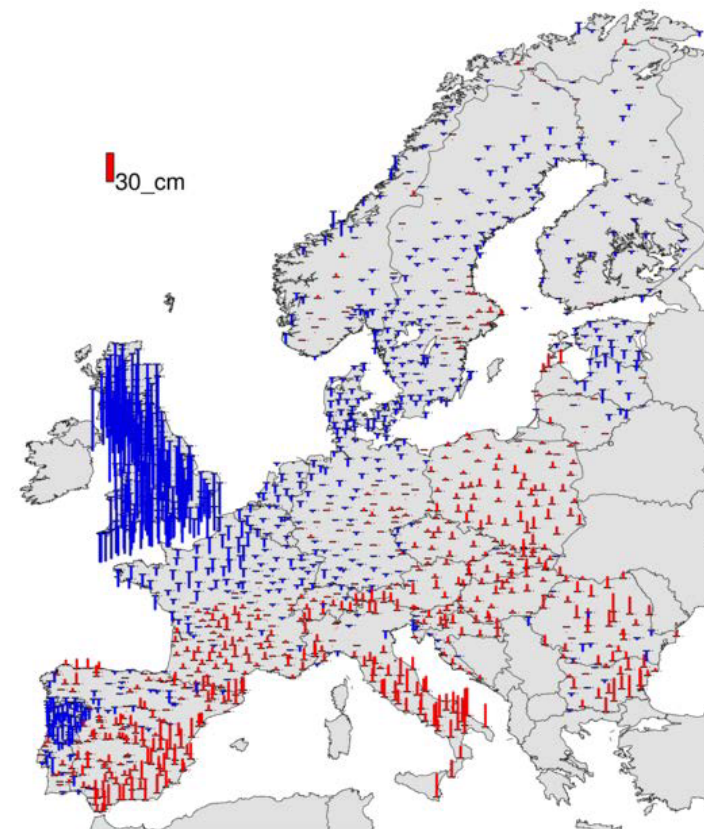


Abbildung 5-9: EUVN-DA-Punkte und Vergleich mit dem Europäischen Quasigeoid EGG2008.

5.7. Die europäischen Geoidmodelle

Im Verlauf der letzten Jahre wurden verschiedene europäische Geoidmodelle berechnet. Diese sind unter dem Namen European Gravimetric Geoid (EGG) plus einer Jahreszahl bekannt. Diese Modelle wurden allesamt am Institut für Ermessung (IfE) der Universität Hannover (von H. Denker) berechnet; es sind rein gravimetrische Lösungen unter Einbezug von Satellitendaten (v.a. GRACE), seit diese verfügbar sind. GPS-Nivellement wurde offiziell nur zur Verifizierung verwendet, ausser in einigen Testversionen. Als Methode der Geoidbestimmung wurde FFT (Fast Fourier Transformation) angewendet.

Aus der Schweiz wurde in den frühen Lösungen der gravimetrische Datensatz verwendet, welcher damals beim BGI (Bureau Gravimétrique International) vorhanden war. Das waren insbesondere die für die Schwerkarte 1980 verwendeten Daten (plus einige ältere lokale Projekte). Ab 2004 stand dem IfE der Datensatz für den gravimetrischen Atlas 1:100 000 zur Verfügung. Ab diesem Zeitpunkt wurde auch das DHM25 als Geländemodell verwendet. In der Regel handelt es sich bei den EGG-Modellen um ein Quasigeoid. Geoidmodelle wurden daraus teilweise mit einer einfachen Methode aus Schwereanomalien berechnet. Die bisher publizierten Modelle sind EGG1996, EGG1997, EGG2007, EGG2008 und EGG2015. Publiziert wurden die EGG-Modelle mit einer Auflösung von 1x1,5 Bogenminuten in den älteren und mit 1x1 Bogenminuten in den neueren Modellen.

In den neueren Berechnungen wurde EVRF2007 als Höhenrahmen verwendet. Da die EGG-Modelle jedoch rein gravimetrisch sind, ist die Transformation in EVRF2007 nur genähert möglich. Eine streng zu ETRF2007 (oder auch ETRF2019) kompatible Transformationsfläche existiert noch nicht. Dazu müsste ein Geoidmodell berechnet werden, welches auch die GNSS-Nivellement-Messungen mitverwendet. Dies ist eines der nächsten Ziele von EUREF. Das bedingt jedoch zunächst eine Aktualisierung des europäischen GNSS-Nivellement-Datensatzes, da seit der Publikation von EUVN-DA (2009) sowohl die Nivellement- als auch die GNSS-Höhen geändert haben dürften.

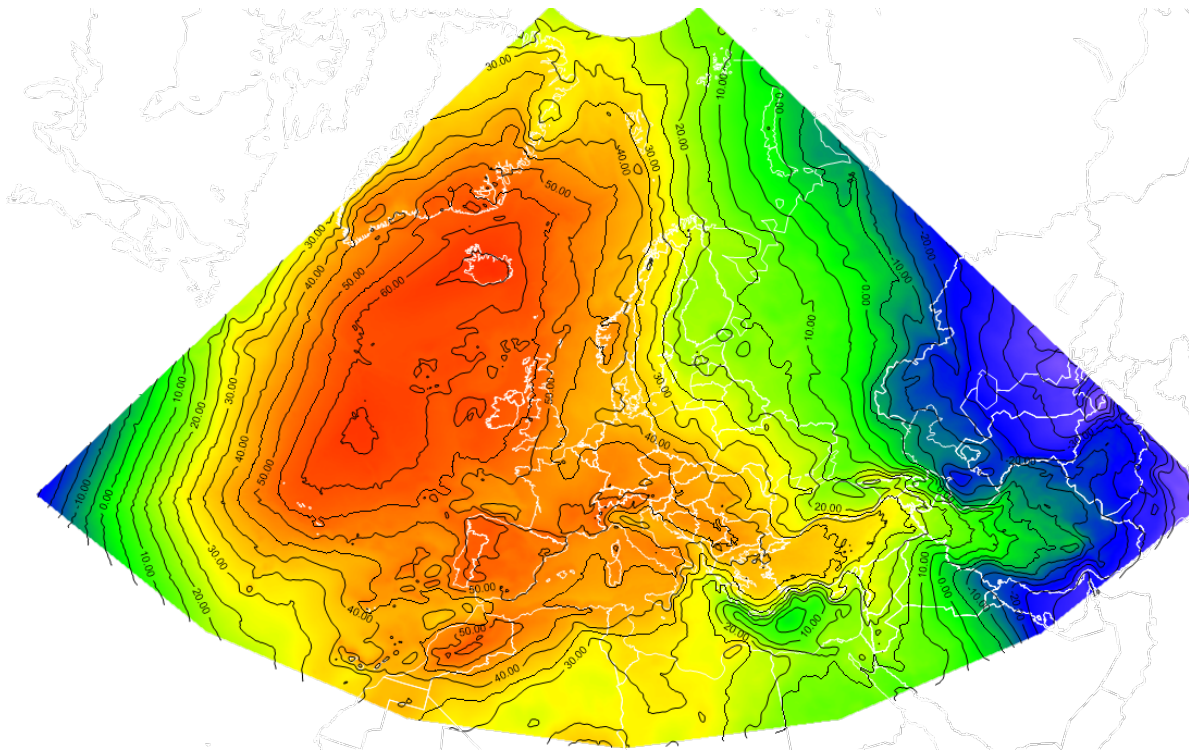


Abbildung 5-10: Das europäische Geoidmodell EGG2015 (Isolinienabstand 5 m).

Wenn wir das EGG2015 lokal mit einem Zoom auf den Alpenraum betrachten, so erkennen wir die hohe räumliche Auflösung und den Detailreichtum des Modells.

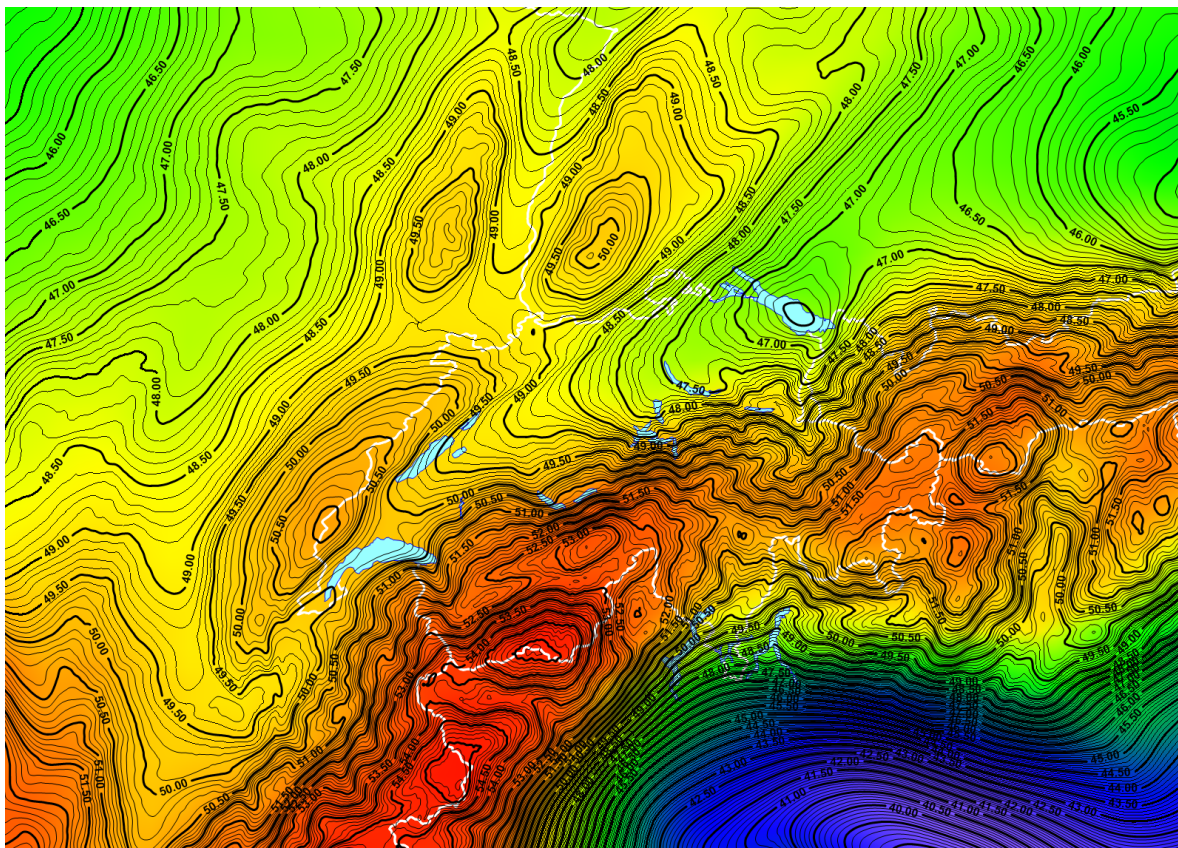


Abbildung 5-11: Quasigeoid EGG2015 im Alpenraum.





6. Nationale Höhenreferenzsysteme

Dieses Kapitel stützt sich hauptsächlich auf folgende Quellen:

- Blueprint for 2022, Teil 1: Geometric Coordinates (National Geodetic Survey, 2017a)
- Blueprint for 2022, Teil 2: Geopotential Coordinates (National Geodetic Survey, 2017b)
- Blueprint for 2022, Teil 3: Working in the Modernized NSRS (National Geodetic Survey, 2019)

6.1. USA

Das neue US-amerikanische *North American and Pacific Geopotential Datum 2022* (NAPGD2022), das 2022 eingeführt werden soll, umfasst vier Produkte:

- ein globales Modell des Schwerefelds GM2022
- regionale Gitter der Geoidundulation von GEOID2022
- regionale Gitter der Abweichungen von der Vertikalen von DEFLEC2022
- regionale Gitter der Oberflächenschwerkraft GRAV2022

Die Höhenverbreitung erfolgt über ellipsoidische Höhen und unter Anwendung des Modells GEOID2022. Der primäre Zugang zum Höhenbezugsrahmen wird daher über GNSS erfolgen. Das Nivellement bleibt die erste Wahl bei der lokalen Übertragung von Höhen mit sehr hoher Genauigkeit, muss sich aber neu auf orthometrische Höhen stützen, die durch GNSS bestimmt werden.

6.1.1. Hintergrund

Das alte nordamerikanische Höhendatum (NAVD88) weist erhebliche Mängel auf. Die Unterschiede zwischen der Fläche, die durch die NAVD88-Höhen $H=0$ gebildet wird und einem gravimetrischen Geoid zeigen systematische Fehler im Meterbereich und eine Neigung von Südwest nach Nordost (Abbildung 6-1). In Alaska und aufgrund der Extrapolation von Messungen ausserhalb von Nivellementlinien sind die Unterschiede noch grösser. Die Gründe für diese Unterschiede sind:

- die nicht geozentrische Lagerung des amerikanischen planimetrischen Bezugsrahmens;
- die durch das Nivellement eingeführte Verzerrung;
- systematischer Unterschied durch die Wahl des Bezugspunktes (Pegelstation in St. Lawrence River).

Dementsprechend ist ein rein gravimetrisches Geoidmodell unzureichend, um ellipsoidische Höhen in NAVD88-Höhen umzuwandeln.

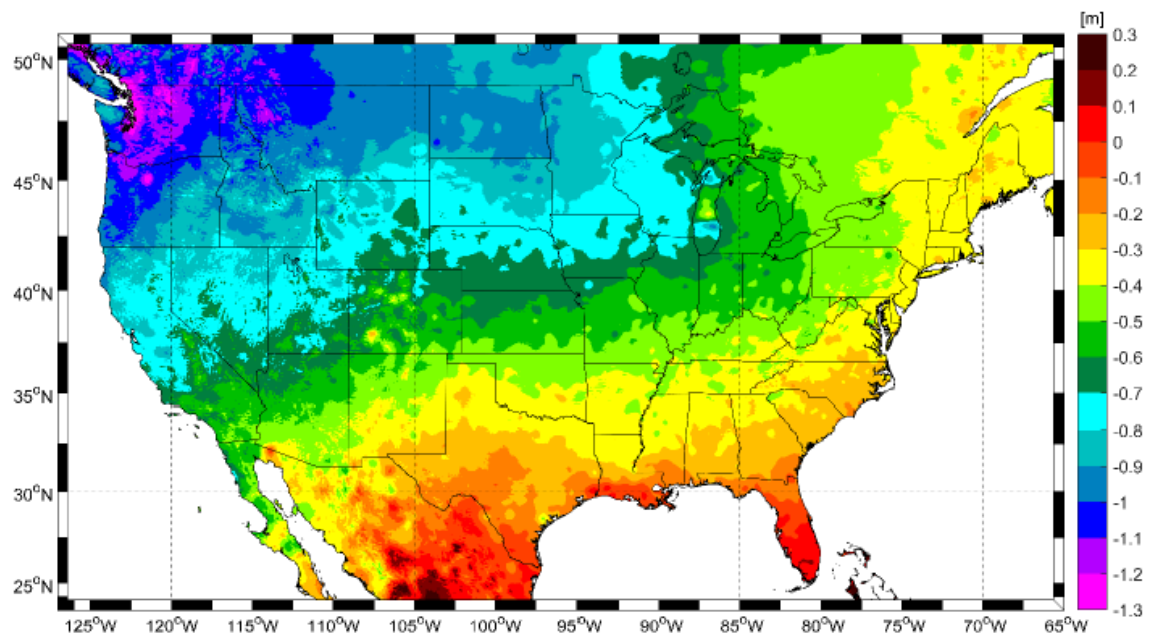


Abbildung 6-1: Unterschiede zwischen der Oberfläche der Höhen $H=0$ in NAVD88 und einem gravimetrischen Geoid.

6.1.2. Erneuerung der Höhenangaben

Der *National Geodetic Survey* (NGS) schätzte die Kosten für die Erneuerung des Nivellements auf 200 Millionen bis 2 Milliarden US-Dollar. Ungelöst wären durch die Erneuerung des Nivellements folgende Probleme geblieben:

- Vorhandensein systematischer Effekte im Nivellement
- Stabilität der Höhenfixpunkte nicht gewährleistet
- Dauerhaftigkeit der Fixpunkte nicht gewährleistet (z. B. durch Zerstörung der Punkte)

Der NGS beschloss daher, seinen Ansatz radikal zu ändern und auf eine Höhenbestimmung mittels GNSS und mit einem Geoidmodell umzusteigen. Es sind also die permanenten GNSS-Stationen sowie die Modelle, die den Höhenbezugsrahmen realisieren und materialisieren.

6.1.3. Theoretische Aspekte

Tabelle 6-1 fasst die Merkmale des Nordamerikanischen und Pazifischen Geopotentialdatums 2022 zusammen. NAPGD2022 liefert mindestens:

- die Geoidundulation für alle $t, \lambda, \phi, h_{ell}$
- die Erdbeschleunigung für alle $t, \lambda, \phi, h_{ell}$
- geopotentielle Quoten für alle $t, \lambda, \phi, h_{ell}$
- Abweichungen von der Vertikalen für alle $t, \lambda, \phi, h_{ell}$

Wobei $t, \lambda, \phi, h_{ell}$ für Zeit, Länge, Breite und ellipsoidische Höhe in einem globalen Bezugsrahmen wie ITRF oder dem Rahmen des internationalen GNSS-Dienstes (IGS) stehen.



Tabelle 6-1: Eigenschaften des Nordamerikanischen und Pazifischen Geopotentialdatums 2022.

Subject	Decision
Permanent Tide System	Tide Free (aka "Non-Tidal")
W ₀ of GEOID2022	62,636,856.0 m ² s ⁻²
Epoch of SGEOID2022	TBD (possibly same epoch as the TRFs?)
Reference Frame	IGSxx ²²
Ellipsoid shape (a, f)	GRS-80
GM of normal Field ²³	398,600,500,000,000 m ³ s ⁻²
"a" of normal Field ²³	6,378,137 m
GM of true field ²³	TBD
"a" of true field ²³	TBD
Maximum degree of GM2022	TBD between 2190 and 10,800
Rotation rate of normal field (ω)	0.00007292115 rad s ⁻¹
Rotation rate of full field	Identical to rotation rate of normal field
Grid Spacing of SGEOID2022	TBD (no larger than 1 arcminute)
Grid Spacing of SDEFLEC2022	TBD (no larger than 1 arcminute)
Product format for GRAV2022	TBD
Mean gravity on the plumbline computed from GRAV2022	TBD. But optimally, should account for topographic relief and, if feasible, variation in topographic density.
Product formats for DGEOID2022, DDEFLEC2022, and DNGRAV2022	TBD. If grids, they must be able to capture both secular changes and episodic changes.
Interpolation method of GEOID2022	TBD
Gravity Datum	TBD

Achtung, in der dritten Zeile von unten ist ein Tippfehler vorhanden (DNGRAV2022 statt DGRAV2022).

6.1.4. Komponenten

Als Grundlage für das NAPGD2022 dient ein **globales Modell** des Schwerefelds (Parametrisiert als Kugelflächenfunktionen). Es handelt sich dabei um das Geopotentialmodell GM2022. Es wird folgende Teile umfassen:

- ein statischer Teil mit Ordnung und Grad 2160 (SGM2022)
- ein kinematischer Teil mit sowohl säkularen als auch episodischen Effekten (DGM2022)

Dieses globale Modell wird durch hochauflösende Modelle in **regionalen Gittern** ergänzt für:

- Die Geoidkoten GEOID2022 mit
 - einem statischen Teil SGEOID2022
 - einem Kinematikteil DGEOID2022
- Lotabweichungen an der Oberfläche DEFLEC2022 mit
 - einem statischen Teil SDEFLEC2022
 - einem Kinematikteil DDEFLEC2022
- Die Schwere an der Oberfläche GRAV2022 mit
 - einem statischen Teil SGRAV2022
 - optional auch einem Kinematikteil (vermutlich mit dem Namen DGRAV2022); die Durchführbarkeit muss geprüft werden.

Diese regionalen Gitter decken Folgendes ab:

- die kontinentalen US-Staaten, Alaska, Hawaii, die Karibik, Kanada, Mexiko, Mittelamerika und Grönland
- Amerikanisch-Samoa (nichtinkorporierte Inseln)
- die Marianen-Inseln



6.1.5. Problematik des steigenden Meeresspiegels

Laut NGS-Definition (die der gängigen Definition entspricht) ist das Geoid die Äquipotentialfläche, die sich dem mittleren Meeresspiegel am besten annähert. Aufgrund des steigenden Meeresspiegels würde sich diese Oberfläche verändern, ebenso wie das Schwerepotential W_0 auf dem Geoid (Abbildung 6-2). Die Folge wäre eine Abnahme aller orthometrischen Höhen, und zwar um etwa 3,2 mm pro Jahr. Die NGS empfiehlt ein Geoid, das unabhängig vom Meeresspiegel ist, aber mit der Option einer Anpassung von W_0 in einigen Jahren.

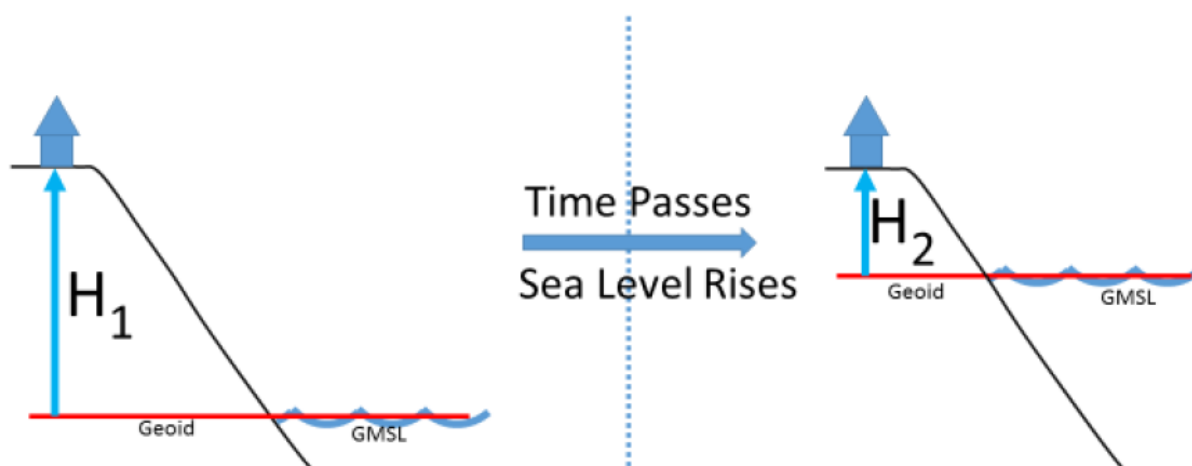


Abbildung 6-2: Abnahme der Höhen mit dem Anstieg des globalen Meeresspiegels (*Global mean sea level GMSL*).

6.1.6. Daten

Ein Überblick über die Daten, die für die Berechnung des globalen Modells und der Gittermodelle verwendet wurden, ist in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 enthalten. Die Hauptquellen sind die Schweremessungen an der Oberfläche, die aerogravimetrischen Messungen (aus dem Projekt «*Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum GRAV-D*») sowie Satellitenmessungen (Schwere, Höhenmessung, Höhenmodell).



Creation/interaction of various components of NAPGD2022
Step 1 of 2: Create Global 3-D **GM2022** model

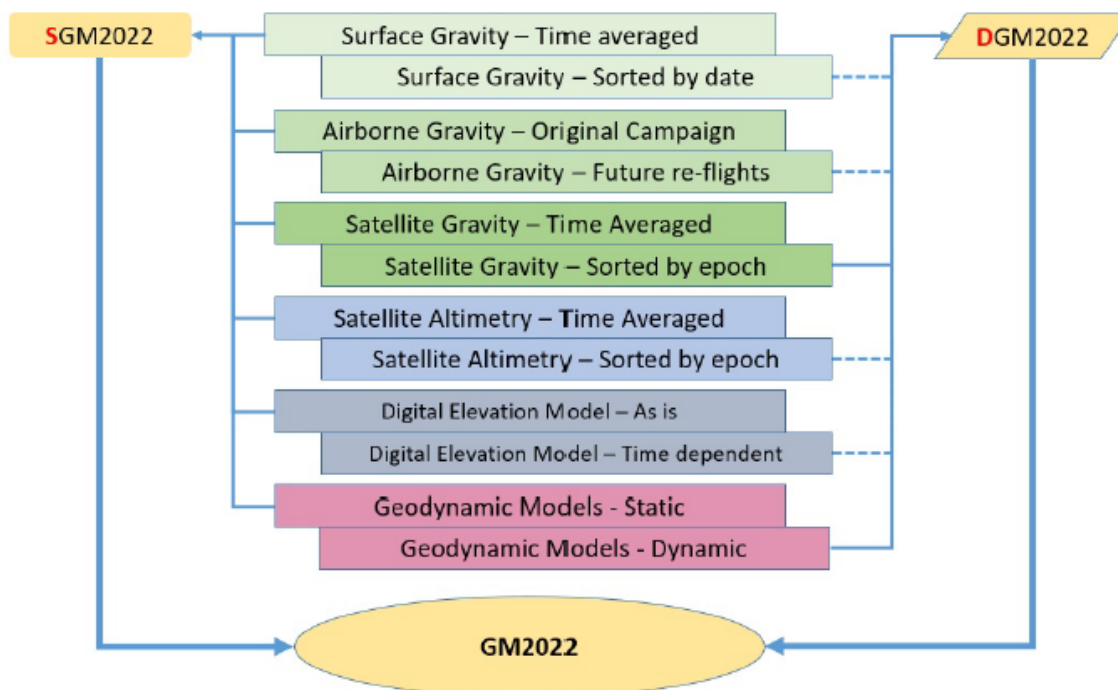


Abbildung 6-3: Datenquellen, die zur Erstellung des globalen Modells GM2022 dienen.

Creation/interaction of various components of NAPGD2022
Step 2 of 2: Create Regional High Resolution Gridded Models: **GEOID2022**, **DEFLEC2022** and **GRAV2022**

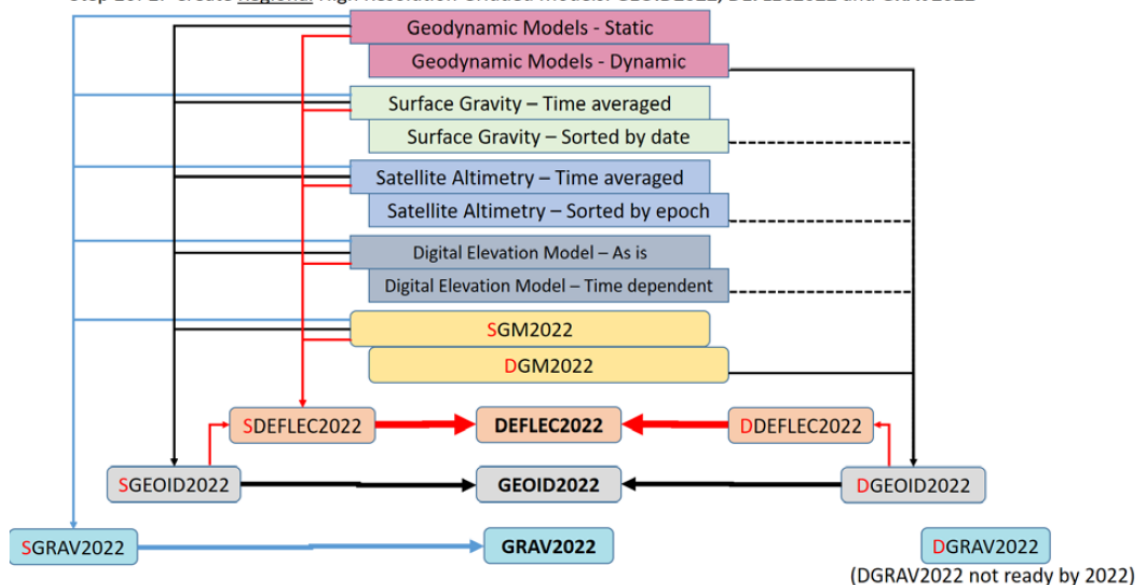


Abbildung 6-4: Datenquellen, die zur Erstellung hochauflösender Raster dienen.



6.1.7. Transformation von Höhenangaben

Es soll ein Transformationstool erstellt werden, um bestehende Höhenangaben in das neue Datum umzuwandeln. Die bestehenden Referenzsysteme sind:

- das nordamerikanische Vertikaldatum NAVD88
- das vertikale Datum von Puerto Rico PRVD02
- das vertikale Datum der Jungferninseln VIVD09
- das vertikale Datum von Amerikanisch-Samoa ASVD02
- das vertikale Datum vom Commonwealth der nördlichen Marianen-Inseln NMVD03
- das vertikale Datum von Guam GUV04

NGS sammelt derzeit GNSS-Daten, um eine Transformation zu berechnen. Dabei wird es sich um ein Update der bestehenden VERTCON-Transformation handeln.

6.1.8. Dissemination

Die Bestimmung von geometrischen Koordinaten, geopotentiellen Koten und orthometrischen Höhen ist in den Abbildungen 6-5 bis 6-7 dargestellt. Es handelt sich um ein mehr oder weniger komplexes Verfahren, je nach gewünschter Genauigkeit:

- Ergebnis mit sehr hoher Genauigkeit, einschliesslich kinematischer Modelle
- Ergebnis mittlerer Genauigkeit, ohne kinematische Modelle

Das Nivellement wird die Standardtechnik für lokale Höhenbestimmung bleiben. Die Nutzer werden eine orthometrische Ausgangshöhe per GNSS generieren müssen, um das lokale Nivellement daran anzuknüpfen. Das genaue Verfahren ist noch nicht festgelegt (z. B. Rapid-Static-Messung oder RTK). Auch andere Alternativen sind denkbar, wie z. B. die Verwendung bestehender GNSS-Nivellement-Punkte.

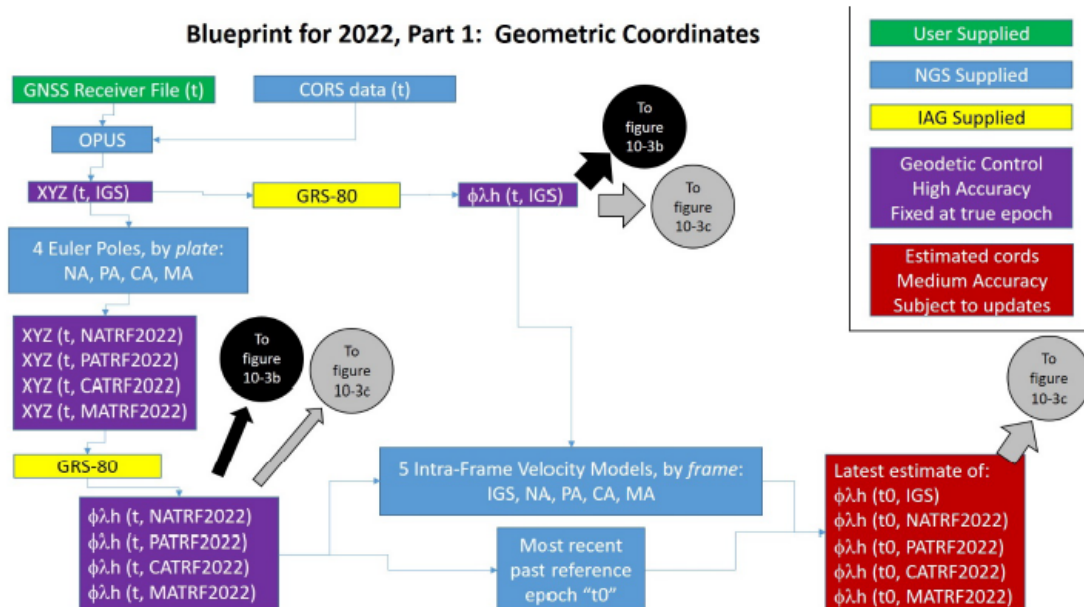
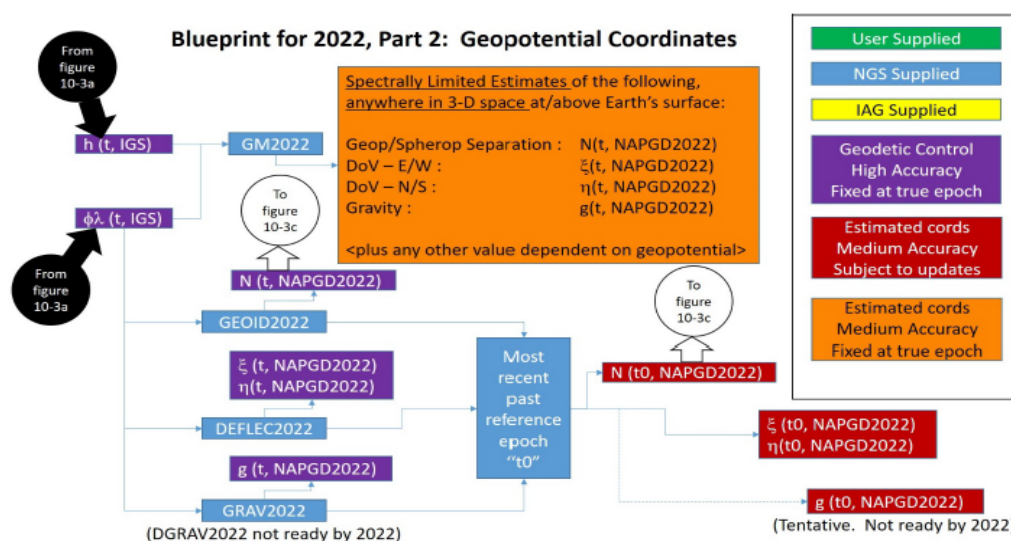


Abbildung 6-5: Bestimmung von geometrischen Koordinaten im neuen Datum.



The diagram illustrates the two-step process for estimating NAPGD2022 geoid heights:

- Step 1 (Top):**
 - Inputs: $h(t, \text{IGS})$ (from figure 10-3a) and $h(t, \text{NAPGD2022})$ (from figure 10-3a, all same).
 - Calculation: $H = h - N$.
 - Output: $H(t, \text{NAPGD2022})$ (from figure 10-3b).
- Step 2 (Bottom):**
 - Inputs: Latest estimate of (all the same): $h(t_0, \text{IGS})$, $h(t_0, \text{NATRF2022})$, $h(t_0, \text{PATRF2022})$, $h(t_0, \text{CATRF2022})$, $h(t_0, \text{MATRF2022})$ (from figure 10-3a).
 - Calculation: $H = h - N$.
 - Output: $H(t_0, \text{NAPGD2022})$ (from figure 10-3b).

Legend:

- User Supplied (Green)
- NGS Supplied (Blue)
- IAG Supplied (Yellow)
- Geodetic Control High Accuracy Fixed at true epoch (Purple)
- Estimated cords Medium Accuracy Subject to updates (Red)
- Estimated cords Medium Accuracy Fixed at true epoch (Orange)

6.1.9. Aktualisierungen

Im Allgemeinen könnten folgende Gründe zu einer Aktualisierung der Modelle führen:

- 55 / 95



- kumulativer Anstieg des Meeresspiegels und Überschreitung eines bestimmten Schwellenwertes

Ziel ist es, eine Genauigkeit von 1 cm oder besser in Bezug auf die Standardabweichung im gesamten Land zu gewährleisten.

6.2. Norwegen

NN2000 (*Lysaker & Vestøl, 2020*) ist der neueste norwegische Höhenbezugsrahmen. Er ist konsistent mit den schwedischen und finnischen Höhenrahmen RH2000 und N2000. Es handelt sich um ein Zero-Tide-System mit Normalhöhen. Die Dissemination erfolgt mit Hilfe von 19 000 Fixpunkten.

6.2.1. Angleichung an die europäischen Rahmenwerke

NN2000 unterscheidet sich von EVRF2000 und EVRF2007. Die Unterschiede zu EVRF2007 lagen zwischen 0 und 2 cm in der anfänglichen Realisierung und zwischen -4 und 6 cm in der endgültigen Realisierung von NN2000.

6.2.2. Historischer Rahmen

Der historische Rahmen trägt die Bezeichnung NN1954. Er wurde dank Nivellementmessungen entlang der Hauptkommunikationslinien südlich des Polarkreises erstellt. NN1954 weist aufgrund der nicht modellierten postglazialen Landhebung Probleme auf. Die Vermessung des gesamten Netzes dauerte 40 Jahre und führte zu erheblichen Verformungen des Netzes zwischen dem Beginn und dem Ende der Messungen. Darüber hinaus erwies sich der Pegel von Oslo als Referenz als ungeeignet, ebenfalls aufgrund der postglazialen Landhebung.

Eine Studie schätzt den Unterschied zwischen NN1954 und einem nach einem postglazialen Landhebungsmodell berichtigten NN1954 auf mehr als 20 cm.

Eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich aus der Verwendung von «sphäroidal-orthometrischen» Korrekturen. In diesem Fall wird die Schwerkraft nicht gemessen, sondern mithilfe der Formel von Clairaut berechnet. Die resultierenden Höhen ergeben sich nicht aus geopotentiellen Knoten.

6.2.3. Der Baltische Nivellementring (BLR2000)

Die Übernahme von EVRF2000 in Norwegen wurde untersucht. Jedoch:

- Die Anbindung der nordischen Länder an das europäische Netz für das einheitliche Nivellement 95/98 war schwach.
- Die postglaziale Landhebung wird in EVRF2000 nicht rigoros behandelt.

Aus diesen Gründen berechneten die baltischen Länder den Baltischen Nivellementring (BLR2000), dargestellt in der Abbildung 6-8, unter Verwendung des Post-Glacial-Uplift-Modells NKG2005LU.

Das schwedische (RH2000) und das finnische (N2000) System sind leicht abgeänderte Versionen von BLR2000. NN2000 wurde nach demselben Verfahren wie BLR2000 berechnet.

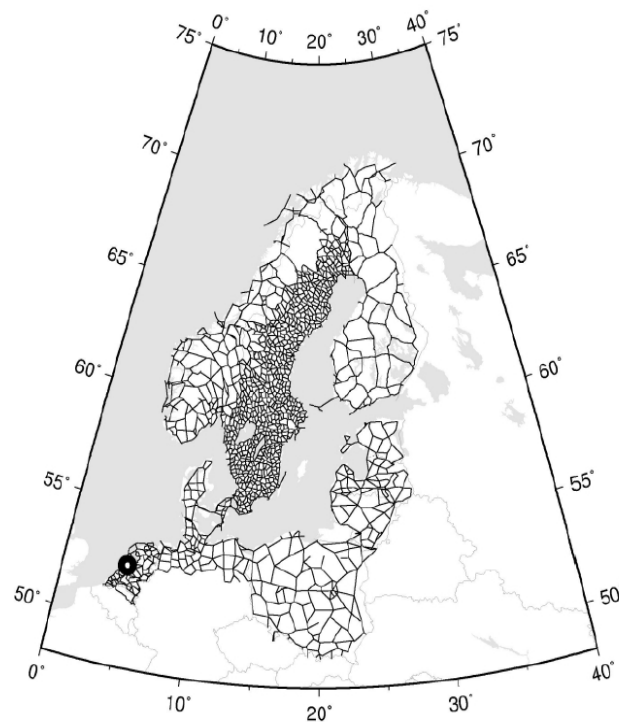


Abbildung 6-8: Der Baltische Nivellementring BLR2000. Der Kreis zeigt den Fundamentalpunkt in Amsterdam.

6.2.4. Theoretische Grundlagen für die Erstellung von NN2000

NN2000 ist ein Zero-Tide-System, das an den Pegel von Amsterdam (NAP) zur Epoche 2000.0 angeschlossen ist:

$$C_{NAP} = 0 \quad (6.1)$$

$$W_{NAP} = U_{0_{GRS80}} \quad (6.2)$$

Wobei C_{NAP} die geopotentielle Kote von Amsterdam, W_{NAP} das Schwerepotential in Amsterdam und $U_{0_{GRS80}}$ das Normalpotential gemäss GRS80 sind.

Angewendet wird das Post-Glacial-Uplift-Modell der Nordischen Geodätischen Kommission (NKG2005LU). Das System wird über die Normalhöhen von 19 000 Fixpunkten erster Ordnung realisiert.

6.2.5. Nivellementmessungen

NN2000 wird anhand von 26 000 km Nivellement (Abbildung 6-9) berechnet, wobei auch das Eisenbahn-nivellementnetz einbezogen wird. Eine besondere Schwierigkeit stellen die Fjorde dar. Um Polygone zu definieren und eine Kontrolle zu erhalten, werden Messungen quer durch bestimmte Fjorde durchgeführt (116 Fjordquerungen mit einer durchschnittlichen Distanz von 2 km). Es werden simultane Zenitwinkel-messungen durchgeführt, bei denen jedoch die Lotabweichungen nicht berücksichtigt wurden. Diese Messungen verschlechtern im Allgemeinen die Genauigkeit des Netzes, bieten aber eine gute Kontrolle.

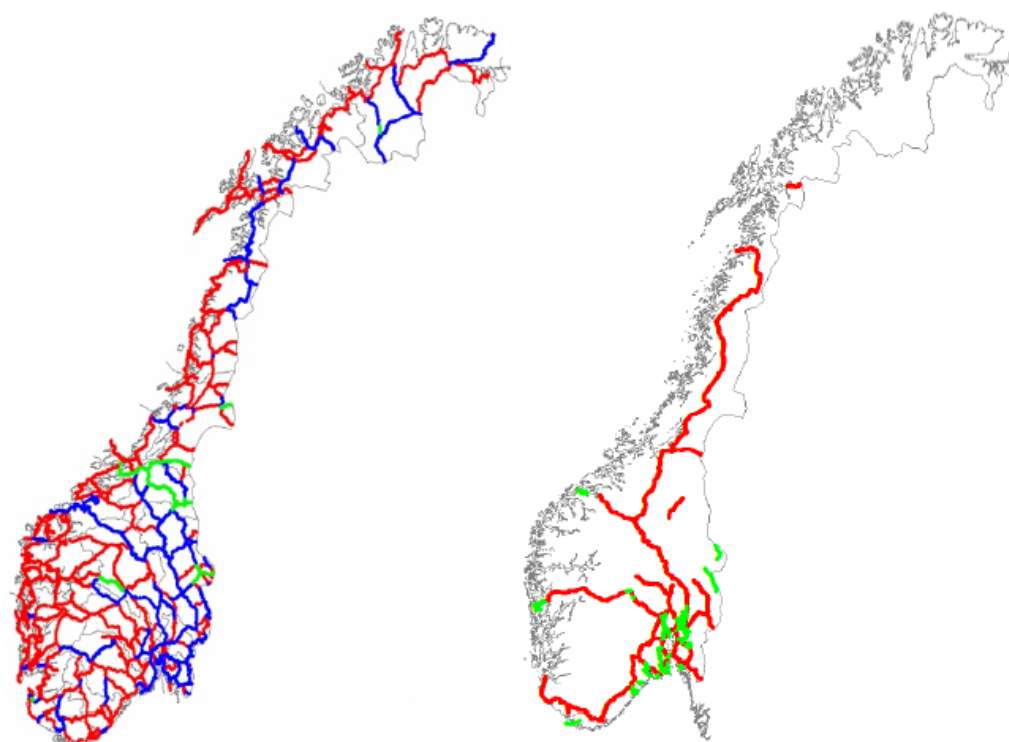


Abbildung 6-9: links: Norwegisches Netz erster Ordnung. Rot = 1 Messung, blau = 2 zwei Messungen, grün = 3 Messungen. Rechts: Eisenbahnnivellementnetz (rot) und Netz zweiter Ordnung (grün).

6.2.6. Gravimetrische Messungen

Neben relativen Messungen mit LaCoste-Romberg (LCR) und Scintrex CG-5 Instrumenten gibt es ein absolutes Netz, das mit einem FG5 Absolutgravimeter vermessen wurde, sowie 250 Stationen, die mit einem feldtauglichen A10 Absolutgravimeter vermessen wurden.

Die Höhenfixpunkte werden nicht systematisch vermessen. Für die Berechnung von NN2000 wurden interpolierte Werte verwendet.

6.2.7. Das Gezeitensystem

Auf das Nivellement werden keine Gezeitenkorrekturen angewendet, es befindet sich daher in einem Mean-Tide-System. Periodische Korrekturen werden auf die gravimetrischen Messungen angewendet, was ebenfalls zu Mean-Tide-Werten führt. Die Endergebnisse werden in Zero-Tide umgerechnet.

6.2.8. Dissemination

Die Dissemination der Höhen wird im NN2000-Bericht nur sehr kurz angesprochen (Abbildung 6-10). Die Dissemination erfolgt über ein «*fitted geoid model*» oder «*height reference model*» (*HREF*). Es handelt sich um ein nicht rein gravimetrisches Geoidmodell, das so berechnet wird, dass es mit den GNSS-Nivellementpunkten übereinstimmt. Nutzerinnen und Nutzer erhalten somit sowohl über Nivellement (Fixpunkte) als auch über GNSS Zugang zu Höhen in NN2000.

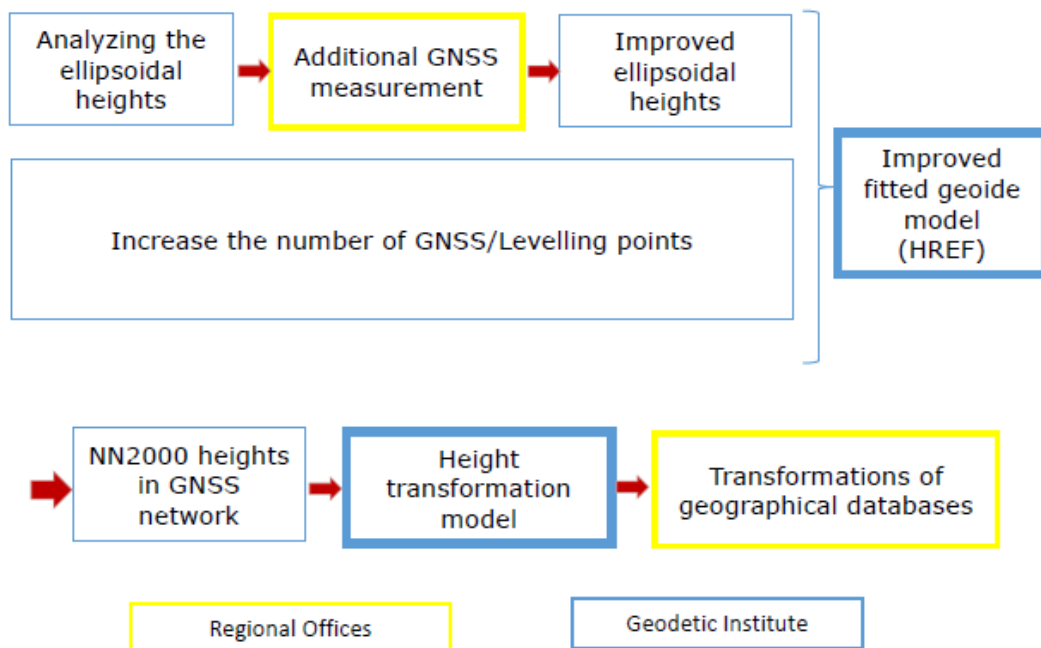


Abbildung 6-10: Prozess der Höhen-Dissemination.

6.2.9. Übergang zum neuen Rahmen

Der Wechsel des Höhenbezugsrahmens wird nur sehr kurz beschrieben. Eine Umwandlung, die auf der Kollokation nach den kleinsten Quadraten basiert, wird berechnet (Abbildung 6-11). Anschliessend wird die Transformation veröffentlicht und die Regionalämter sind für die Anpassung der bestehenden Daten zuständig. Die Partner sind:

- die Gemeinden
- die Strassenverwaltungen
- weitere Partner

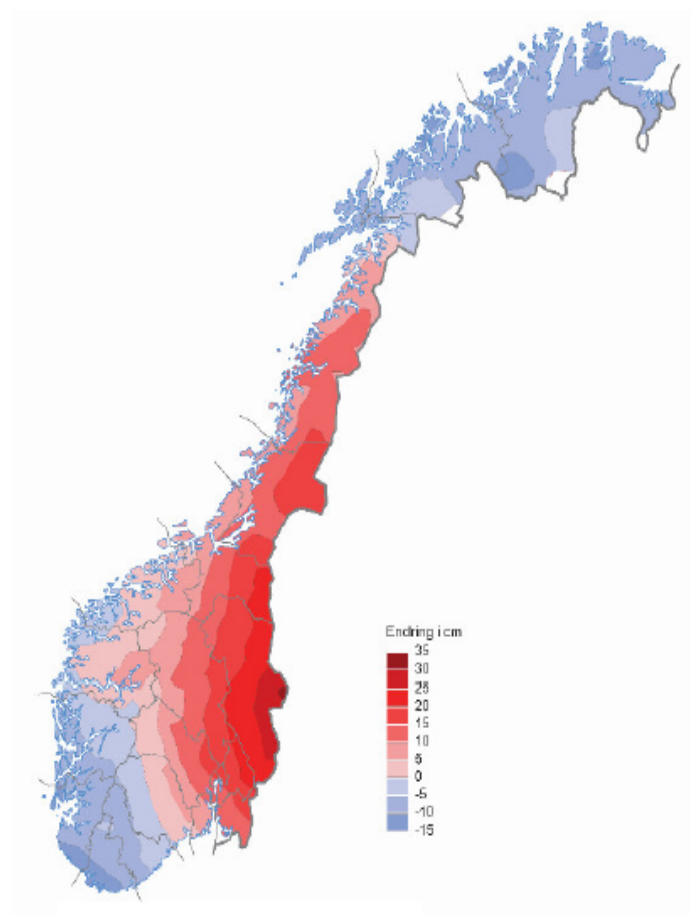


Abbildung 6-11: Höhenunterschiede zwischen LN1954 und LN2000.

6.3. Deutschland

Nachfolgende Dokumentation zu den verwendeten Höhensystemen in Deutschland und dem aktuell gültigen Höhensystem DHHN2016 (Deutsches Haupthöhennetz 2016) bezieht sich im Wesentlichen auf die Publikation «DHHN2016: Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitlich integrierte geodätische Raumbezug 2016» des Arbeitskreises Raumbezug der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland aus dem Jahre 2018 (AdV, 2018).

6.3.1. Geschichtliche Entwicklung

Die nachfolgende Tabelle (AdV, 2018) ergibt einen Überblick über die auf deutschem Gebiet verwendeten Höhenreferenzrahmen (Tab. 6-2). Mit Ausnahme der während der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) angelegten Höhenrahmen beziehen sich alle verwendeten Höhenangaben in den alten Bundesländern – und insbesondere im angrenzenden Baden-Württemberg – auf den Amsterdamer Pegel (Normaal Amsterdams Peil, kurz NAP).

Für die unterschiedlichen Realisierungen wurden jeweils auch spezielle Datumspunkte gewählt (z.B. die Sternwarte Berlin, der Nullpunkt Hoppegarten NHP oder der UELN-Knotenpunkt Wallenhorst bei Osnabrück), die jeweils von NAP abgeleitet waren. Dies in Analogie zu RPN in der Schweiz, da NAP für Deutschland ebenfalls nicht direkt zugänglich war.

Bis zur Einführung des DHHN92 wurde in den alten Bundesländern das DHHN12 mit normal-orthometrischen Höhen verwendet. Mit dem Zusammenschluss wurden die bereits in der DDR verwendeten Normalhöhen auch in den alten Bundesländern eingeführt (DHHN92/Status 160).



Tabelle 6-2: Überblick über die Höhenreferenzrahmen in Deutschland (AdV, 2018)

Messepoche	Höhen	Netz	Nullniveau	Datumspunkt	Höhenart	Bemerkung
1868 - 1894	Höhen über NN im "alten System"	Gradmessungs-nivellement	ab 1879 NAP	NHP Sternwarte Berlin	keine Korrekturen wegen Schwere angebracht	Trigonometrische Abteilung der Preuss. Landesaufnahme, sächsische Landesaufnahme
1910 - 1944	Höhen über NN im "neuen System"	DHHN12	NAP	NHP Sternwarte Berlin	Normalorthometrische Höhen	In Ausgleichung von Netzteil I Übertragung der Höhe von NHP Sternwarte Berlin nach NHP Hoppegarten
1947 - 1962	Höhen über NN im "neuen System"	DHHN12	NAP	Anschlusszwang an alte Netzteile	Normalorthometrische Höhen	nur alte Bundesländer: Anfele-derung von 3 Netzteilen + regiona-le Punkteinschaltungen
1947 - 1962	keine amtlichen Höhen	Nivellementsnetz 1960	NAP	UF I Wallenhorst	Normalorthometrische Höhen, orthometrische Höhen (Helmerthöhen), geopotentielle Knoten	nur alte Bundesländer, zu Unter-suchungszwecken
1954 - 1956	Höhen über HN	SNN56	Pegel Kronstadt	Kronstadt	Normalhöhen	nur neue Bundesländer
1974 - 1976	Höhen über HN	SNN76	Pegel Kronstadt	NHP Hoppegarten	Normalhöhen	nur neue Bundesländer
1980 - 1988	Höhen über NN	DHHN85	NAP	UF I Wallenhorst	Normalorthometrische Höhen	nur alte Bundesländer
1974 - 1992	Höhen über NHN	DHHN92	NAP	Kirche Wallen-horst	Normalhöhen	Messungen des SNN76 und DHHN85 sowie von 16 Ver-bindungslinien zwischen diesen Netzteilen (1991-1992)
2004 - 2013	Höhen über NHN	DHHN2016	NAP	72 Punkte in Deutschland	Normalhöhen	

Bezüglich dem angrenzenden Bundesland Baden-Württemberg lässt sich ergänzend festhalten:

Vor 1912 wurde ein Höhensystem (ohne Schwerereduktion) verwendet, welches als Fundamentalpunkt die Sternwarte Berlin aufwies. Die dort angegebene Höhe von 37 000 m.ü.NN (NN: Normalnull) wurde vom Pegel Amsterdam abgeleitet.

DHHN12 entstand 1912 nach dem Abbruch des damaligen Nullpunkts (Sternwarte Berlin, abgeleitet von Anschlussmessungen an Amsterdam) und der Errichtung des neuen Fundamentalpunktes «Hoppegarten» bei Berlin. Um die jeweiligen Höhen zu unterscheiden, wurde der sog. Höhenstatus eingeführt. Der ursprüngliche Höhenstatus des DHHN12 war der sog. Status 100. Höhen mit Status 100 wurden in Baden-Württemberg bis 1979 geführt.

Nach umfangreichen Neumessungen wurde in Baden-Württemberg der Höhenstatus 130 eingeführt. Das Höhennetz wurde weiterhin als DHHN12 bezeichnet und enthält normal-orthometrische Höhen. Eingeführt wurde der Status 130 im Jahre 1971 (oder nach anderen Quellen 1979). Abgelöst wurde er 2008 durch das DHHN92. Bis 2012 waren noch Höhen im Status 130 erhältlich.

Ab dem 1. Januar 2008 war das Höhensystem DHHN92 amtlich gültig. Dies waren nun erstmals Normalhöhen bezüglich Amsterdam. Zur Unterscheidung wurde den neuen Höhen der Status 160 zugewiesen. Realisiert wurde DHHN92 durch das Festhalten des Punktes «Wallenhorst» (bei Osnabrück) in der UELN-Lösung 73/76. Es ist dies der zu Amsterdam am nächsten gelegene Knotenpunkt des UELN auf deutschem Boden.

DHHN92 (und DHHN2016; vgl. 6.4) wurde nur für die Punkte 1. und 2. Ordnung eingeführt. Der Unterhalt der Linien 3. Ordnung wurde 2004 eingestellt. Die Höhen der Punkte 3. Ordnung wurden aber weiterhin publiziert. Allerdings im damals gültigen Höhensystem DHHN12 (Höhenstatus 130, normal-orthometrische Höhen bezüglich Amsterdam).

Des Weiteren kann zu den unterschiedlichen Höhenstatus folgendes festgehalten werden:



Höhenstatus 110 und 120 gab es auch noch in einigen Bundesländern (jedoch nicht Baden-Württemberg). Das waren jeweils Modifikationen des DHHN12 nach Neumessungen. In Westdeutschland gab es auch ein DHHN85. Der Plan war die Einführung von orthometrischen Höhen (im Höhenstatus 140). Diese wurden nur in wenigen Bundesländern eingeführt, da die Lösung erst 1990 vorlag und bald darauf durch DHHN92 (gesamtdeutsche Ausgleichung, Normalhöhen) abgelöst wurde. In Baden-Württemberg wurde der Status 140 nie etabliert.

Die Höhenstatus 150 und 156 bezogen sich auf die in der DDR verwendeten Normalhöhenysteme (SNN56 und SNN76).

6.3.2. Deutsches Haupthöhennetz DHHN2016

Mit nachfolgendem Beschluss aus dem Jahre 2016 wurde durch die AdV DHHN2016 für die Bundesrepublik Deutschland als verbindlich erklärt.

Beschluss 128/4 gemäß Nr. 5.1 der GO-AdV 2016

**Einführung der Ergebnisse des Projektes
„Erneuerung des DHHN“**

1. Das Plenum der AdV beschließt die Realisierung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland zum 1. Dezember 2016 mit den folgenden Komponenten einzuführen:
 - a) das „Deutsche Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016)“ als neuen amtlichen Höhenbezugsrahmen,
 - b) die verbesserten Koordinaten und verbesserten ellipsoidischen Höhen der Referenzstationspunkte (ETRS89/DREF91/Realisierung2016) des amtlichen SAPOS®-Referenzstationsnetzes (RSN),
 - c) die Koordinaten und ellipsoidischen Höhen der neu eingeführten Geodätischen Grundnetzpunkte (ETRS89/DREF91/Realisierung2016) des amtlichen Geodätischen Grundnetzes (GGN),
 - d) das „German Combined Geoid 2016 (GCG2016)“ als neues amtliches AdV-Quasigeoid,
 - e) das „Deutsche Hauptschwerenetz 2016 (DHSN2016)“ als neuen amtlichen Schwerebezugsrahmen, und
 - f) das Modell HOETRA2016 in der Version 1.0 zur Transformation von amtlichen Höhen im System DHHN92 in zukünftige amtliche Höhen des Systems DHHN2016 und umgekehrt.
2. Die Umsetzung der Einführung erfolgt in den Ländern bis spätestens zum 30. Juni 2017.
3. Für den reibungslosen Betrieb des SAPOS®-Dienstes ist die stichtagsbezogene bundesweite Einführung der Koordinaten und ellipsoidischen Höhen der Referenzstationspunkte unerlässlich. Das Plenum beschließt deren Einführung zum 1. Dezember 2016.

Abbildung 6-12: AdV-Plenumsbeschluss zur Einführung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs (AdV, 2018).

In Abbildung 6-12 sind die wesentlichen Hauptbestandteile (a–f) für den sog. integrierten geodätischen Raumbezug festgehalten. Ähnlich den Bestrebungen bei LV95/LHN95 in der Schweiz basieren diese auf den nachfolgend beschriebenen Komponenten.



i) Deutsches Haupthöhennetz DHHN2016

Das DHHN basiert im Wesentlichen auf den 1.- und 2.-Ordnungslinien der alten Netze DHHN85 und SNN76 (DDR). Insgesamt wurden in den Jahren 2006 – 2011 30 000 km Neumessungen ausgeführt.

Zur sog. Systemfestlegung (Datumsfestlegung) wird in (AdV, 2018) festgehalten:

Tabelle 6-3: Systemfestlegungen (AdV, 2018).

	DHHN92	DHHN2016
Ursprung	NAP – Nullpunkt des Amsterdamer Pegels (mittleres Tidehochwasser in Amsterdam zur Epoche 1683-1684)	
Realisierung des Ursprungs	1 Datumspunkt (Kirche Wallenhorst)	72 Datumspunkte (zwangsfrei, eine Bedingungsgleichung)
Maßstab	SI - Meter	
Höhenart	Normalhöhen	
Normalschwerefeld	GRS80	
Festerdezeiten	Nicht berücksichtigt	Variabler Anteil eliminiert
Reduktion des permanenten Gezeitenanteils	keine (mean tide)	Mean tide
Ozeangezeitenauflast	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt für HH, MV, NI, SH

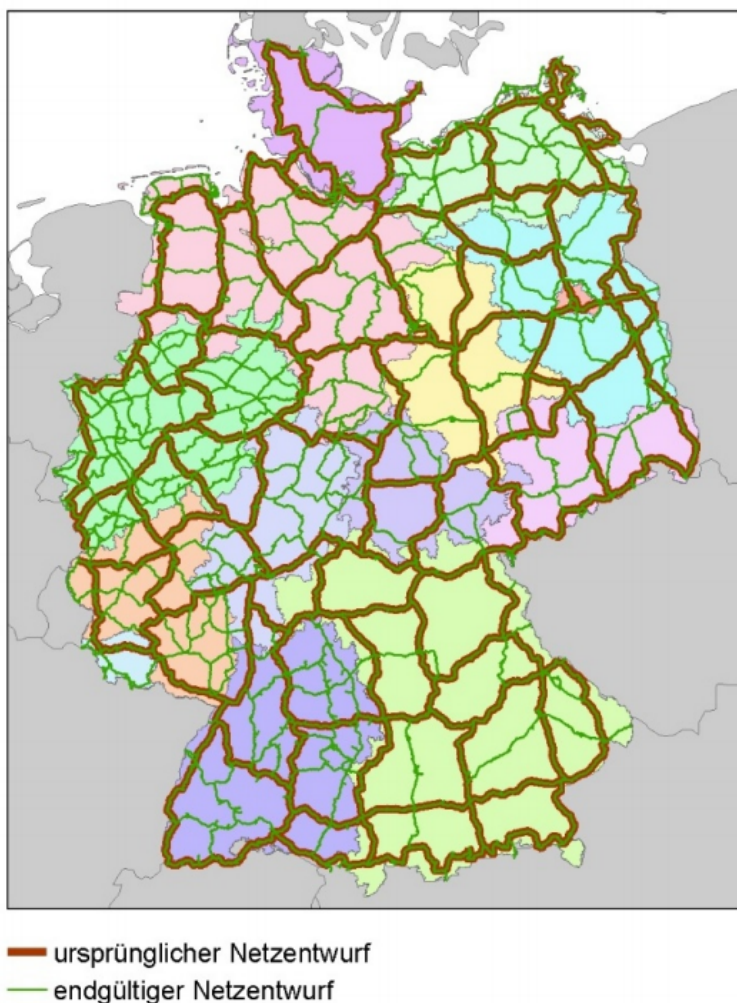


Abbildung 6-13: Netzentwurf deutsches Haupthöhennetz DHHN2016 (AdV, 2018).



Tabelle 6-4: durchgeführte Messungen im deutschen Haupthöhennetz DHHN2016 verteilt auf die einzelnen Bundesländer.

Bundesland	DHHN92 in km	urspr. Netzentwurf		endgültiger Netzentwurf		
		in km	in Prozent des DHHN92	in km	in Prozent des DHHN92	in Prozent des urspr. Entwurfs
Baden-Württemberg	2387	1227	51	2954	124	241
Bayern	5181	3105	60	4363	84	141
Berlin	0	107		136		127
Brandenburg	1776	1078	61	2050	115	190
Hamburg	142	78	55	131	92	168
Hessen	1332	653	49	1788	134	274
Mecklenburg-Vorpommern	1545	1194	77	2769	179	232
Niedersachsen + Bremen	3062	1671	55	4126	135	247
Nordrhein-Westfalen	3979	1318	33	4255	107	323
Rheinland-Pfalz	1919	810	42	2062	107	255
Saarland	85	85	100	312	367	367
Sachsen	1365	871	64	1417	104	163
Sachsen-Anhalt	1270	723	57	1358	107	188
Schleswig-Holstein	1305	628	48	920	70	146
Thüringen	1046	588	56	1168	112	199
Gesamt	26394	14136	54	29809	113	211

ii) SAPOS: verbesserte Koordinaten und ellipsoidische Höhen der Referenzstationspunkte des amtlichen Permanent-Stationsnetzes

Dieses Netz entspricht dem AGNES-Stationsnetz der Schweiz.

iii) Koordinaten und ellipsoidische Höhen der Geodätischen Grundnetzpunkte (GGN)

Im Jahre 2008 wurden insgesamt 250 GNSS-Bodenpunkte verteilt über das gesamte Land gemessen. Diese sind ebenfalls am DHHN2016 angeschlossen, und 100 Punkte sind zusätzlich Absolutschwerepunkte. Dieses Netz weist eine Analogie zum GNSS-Landesnetz LV95 der Schweiz auf.

iv) Quasigeoidmodell GCG2016

Das Quasigeoidmodell GCG ist konsistent zum DHHN2016 und wurde aus umfangreichen landesweiten Schweredaten, dem globalen Schwerefeldmodell GGM, einem aktuellen digitalen Geländemodell sowie den GNSS-Nivellementpunkten aus dem GGN und dem DHHN2016 erstellt (vgl. Abbildung 6-14). Es weist eine Genauigkeit von ± 1 cm im Flachland und von ± 2 cm im Gebirge auf (Analogie zu CH: CHGeo2004).

v) Hauptschwerenetz DHSN2016

Sammlung der Schweremessungen in Analogie zum Schweregrundnetz der Schweiz.

vi) Transformationsmodell HOETRA2016

Zur Vereinfachung der Umstellung vorhandener Datenbestände wurde das Transformationsmodell HOETRA2016 erstellt (vgl. Abbildung 6-15). Damit war auch die Umstellung und Nutzung der Daten der Folgeordnungen im Deutschen Höhennetz (ab 3. Ordnung) gewährleistet. Das Modell berücksichtigt keine zeitlichen Höhenänderungen in Bodenbewegungsgebieten. Es ist bei höchsten Genauigkeitsanforderungen auch kein Ersatz für eine strenge Neuberechnung und/oder Neumessung (Analogie zu CH: *HTRANS*).

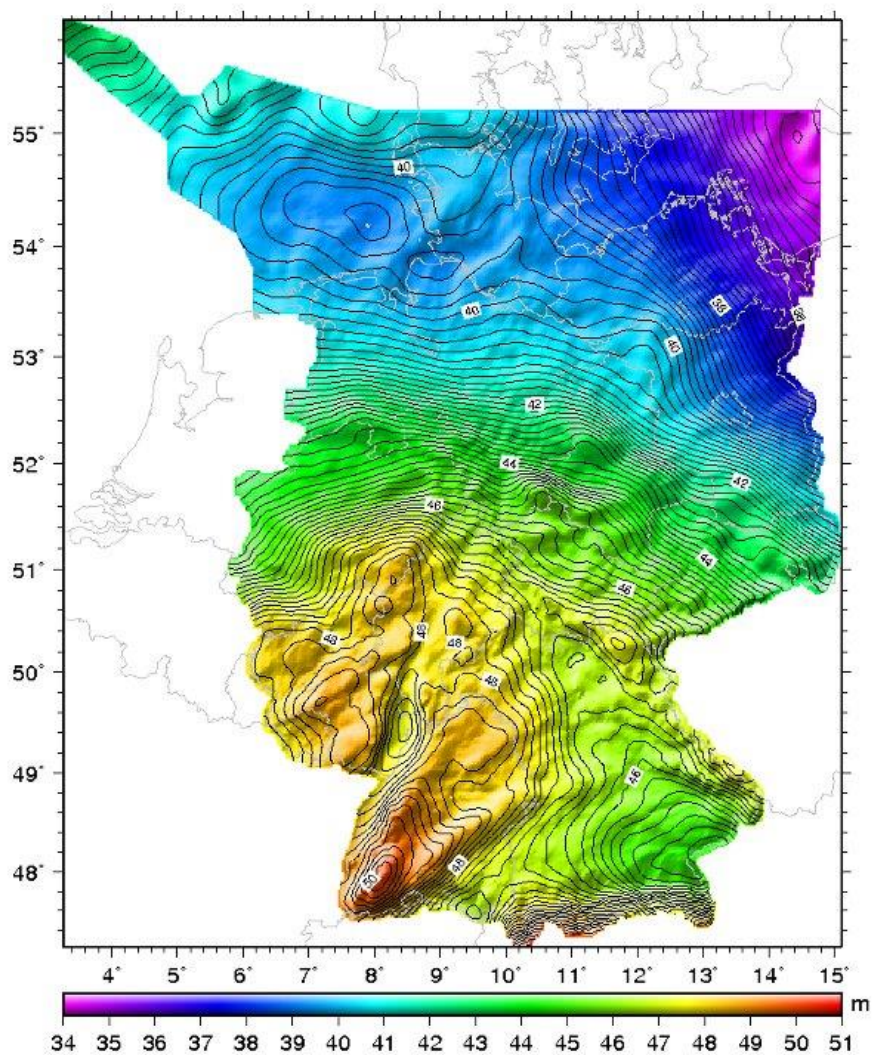


Abbildung 6-14: Quasigeoidmodell GCG2016.

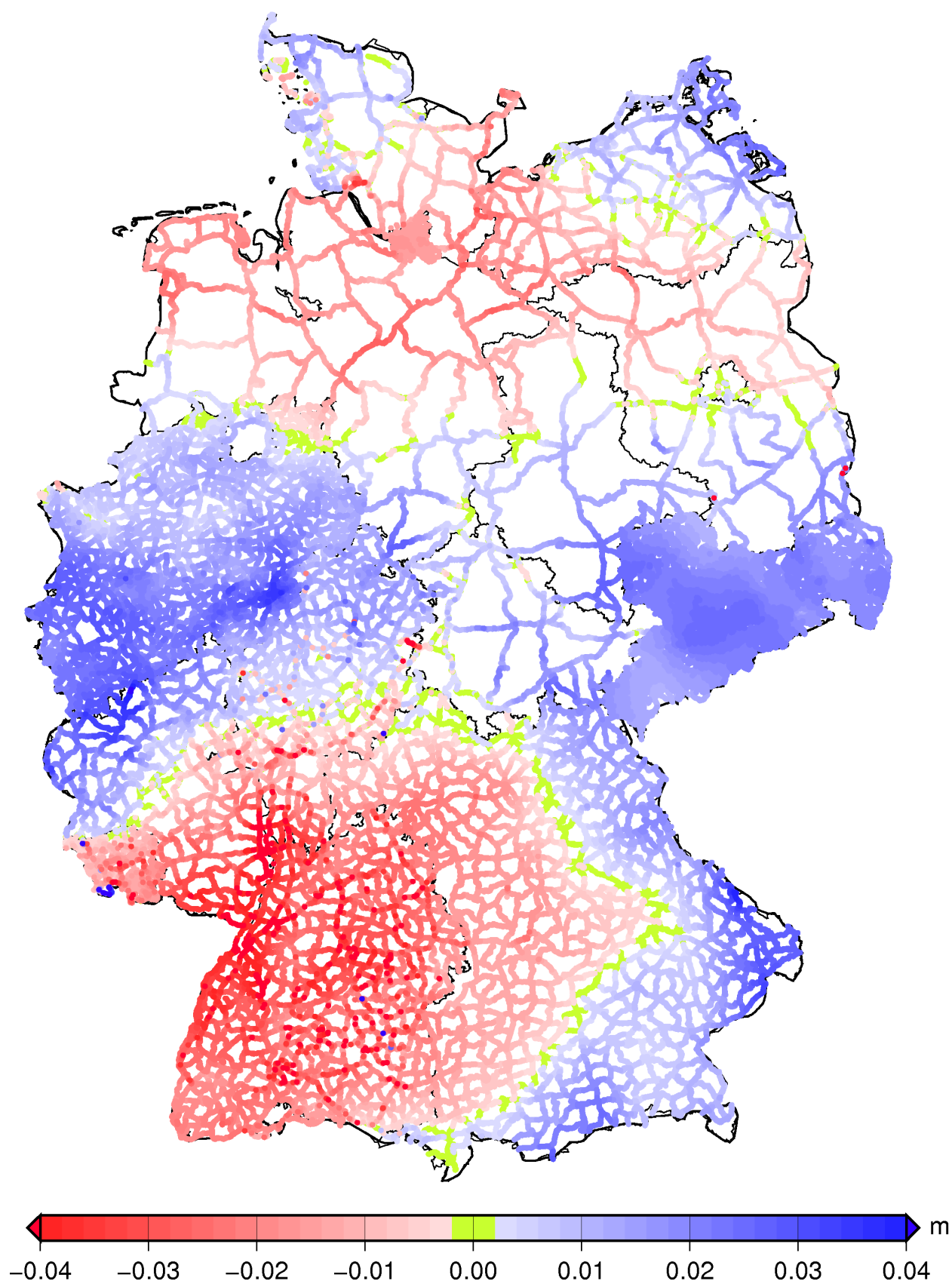


Abbildung 6-15: Höhenunterschiede DHHN2016 minus DHHN92, Realisierung 2016 (Eingangsdaten für die Berechnung des Transformationsmodells HOETRA2016).



Seit dem 1. Juli 2017 ist in Baden-Württemberg das Höhensystem DHHN2016 amtlich. Dieses besteht aus Normalhöhen bezüglich dem Pegel von Amsterdam. Sie tragen den Höhenstatus 170. Noch sind nicht alle Punkte der tieferen Ordnung im Status 170. Für diese Punkte ist der Status 160 weiterhin gültig.

Zur Unterscheidung der Höhen über NN (Höhen über Normalnull) wird bei DHHN2016 von «Höhen über Normalhöhennull» (NHN) gesprochen.

6.4. Frankreich

6.4.1. Geschichtliche Entwicklung

Dieses Kapitel stützt sich auf einen Bericht des Conseil national de l'information géographique (Commission Géopositionnement, 2016) sowie auf Informationen von der offiziellen Homepage des IGN⁶ und auf diverse Vorträge aus den EUREF-Symposien.

Das aktuelle offizielle Höhensystem in Frankreich ist NGF-IGN69, wobei NGF für Nivellement Général de la France steht. Dies ist das dritte nationale Nivellement.

Das erste Nivellement (1857–1864) ist unter dem Namen «NGF-Bourdalouë» bekannt. Sein Nullpunkt war das Fort Saint-Jean in Marseille, und es wurden keine gravimetrischen Korrekturen angebracht. Es war also ein Gebrauchshöhensystem.

Das zweite Nivellement (1884–1892) trägt den Namen «NGF-Lallemand». Sein Nullpunkt ist der Mittelwert des Pegels von Marseille zwischen 1885 und 1892; dieser ist 7,1 cm tiefer als der Nullpunkt von NGF-Bourdalouë. Vom Konzept her war NGF-Lallemand ein orthometrisches System, allerdings basierte es nur auf theoretischen Schwerewerten. Die Festlegung des Schweizer Nullpunkts (Repère Pierre du Niton, «neuer Horizont») basiert im Wesentlichen auf den Anschluss an das französische Netz NGF-Lallemand.

Die Messungen erster Ordnung für das Netz NGF-IGN69 erfolgten zwischen 1962 und 1969. Dabei wurden 39 Polygone mit einer Länge von insgesamt 13 700 km nivelliert. Der Netzaufbau wurde praktisch unverändert von NGF-Lallemand übernommen, und auch der Nullpunkt (Pegel von Marseille) blieb unverändert. Allerdings wurde neu ein Normalhöhensystem eingeführt, welches in Frankreich oft auch als Vignal-Höhen bezeichnet wird⁷; dadurch änderten die Höhen im Norden des Landes um mehr als 60 cm.

Die Verdichtung (2. bis 4. Ordnung) erfolgte vor allem in den 1970er Jahren (bis etwa 1994). Dafür wurde ab 1979 auch, wo dies möglich war, ein motorisiertes Nivellement eingesetzt (NIGEMO, nivellement géométrique motorisé). Vom IGN werden die höhere Geschwindigkeit und kleinere Refraktionseinflüsse (wegen der hohen Instrumenten-Aufstellungen) als Vorteile genannt. Die Zielweiten betragen bis zu 50 Meter (Instrument – Latte). Auf den Linien der 4. Ordnung kam vor allem die Methode *NITRIMO* (*nivellement trigonométrique motorisé*) zum Einsatz: Das sind gegenseitige Höhenwinkel vom Fahrzeug aus mit Maximaldistanzen von bis zu 600 Metern. Schweremessungen erfolgten grundsätzlich nur auf den Linien 1. Ordnung alle 2–5 km und bei Neigungswechseln oder starken Richtungsänderungen (wegen Interpolation). Schweremessungen auf den Linien 2. und 3. Ordnung wurden nur im Gebirge durchgeführt.

Schon länger ist bekannt, dass das IGN69 systematische Fehler von mehreren dm in Nord-Süd-Richtung aufweist. Das wurde zunächst bei den Anschlüssen von Pegelstationen im Norden entdeckt, dann aber auch in der Ausgleichung des Europäischen Nivellements (UELN). Deshalb wurde ab 1996 das Projekt NIREF gestartet, um einige wenige Traversen über das ganze Land neu zu messen.

Vorarbeiten zu NIREF wurden aber schon vorher geleistet. So wurde 1983 eine Direktverbindung der beiden Pegel von Marseille und Dunkerque gemessen, welche den Nord-Süd-Tilt des IGN69 von ca. 20 cm

⁶ www.ign.fr

⁷ Bei Vignal-Höhen wird ein konstanter Schwereregradient von 0,3086 mGal/m verwendet, um die mittlere Normal-schwere zu berechnen.



noch einmal bestätigte. In den 1990er Jahren erfolgte dann noch eine Nachmessung einiger Linien erster Ordnung vor allem im Norden.

Dieses sehr grobe Netz dient vor allem wissenschaftlichen Zwecken für Geodäsie (Vertikalbewegungen, Netzanalysen, neuer Beitrag an UELN) und Ozeanografie. Es ist nicht vorgesehen, es als neues offizielles Höhensystem einzuführen. IGN69 wird bis auf weiteres das offizielle System bleiben, da ein Wechsel des Höhensystems bei den Benutzern keine Unterstützung fand.

Realisiert wird NIREF in erster Linie durch motorisiertes Nivellement (NIGEMO, nivellement géométrique motorisé). Die Linienführung ist relativ direkt und ziemlich unabhängig vom bestehenden Netz des IGN69. Das NIREF verläuft nun auch entlang der Strassen – und nicht mehr nur entlang von Bahnlinien). Für NIREF werden keine Schweremessungen durchgeführt; Schweren werden aus dem bestehenden Datensatz interpoliert.

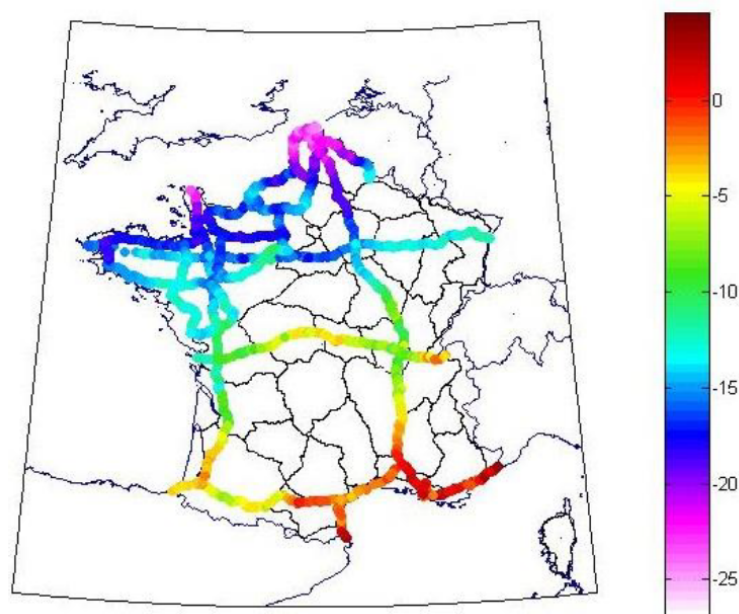


Abbildung 6-16: Differenzen NIREF – IGN69 (Stand 2015), inkl. neu gemessene Linien 1. Ordnung 1992 – 1999 im Norden.

Der Unterhalt des gesamten französischen Nivellementnetzes war sehr kostspielig. Deshalb entschied das CNIG (Conseil National de l'information géographique) 1995, nur noch die Punkte 1. bis 3. Ordnung (25% des Netzes) zu unterhalten. Zudem sollten die Linien von den Bahnlinien auf die Strasse verlegt werden.

Das IGN macht seither aber eigentlich keine Streckennivellements mehr. Die Punkte werden jedoch noch regelmässig in einem festen Turnus begangen, und die Punktbeschreibungen werden aktualisiert. Der eigentliche Unterhalt des Höhenrahmens geschieht aber heute durch das Konzept der «Triplets» mittels GNSS-Nivellement. Der Übergang zu dieser Methode erfolgte im Projekt NIVAG (Nivellement assisté par GPS) in den Jahren 2000 bis 2008. Nach Abschluss des Projekts NIVAG werden diese Triplets seit 2008 in einem Turnus von 12 Jahren neu gemessen und dokumentiert. Diese Nachführungsarbeiten erfolgen unter dem Namen ERNIT (Entretien du réseau de nivellement par les triplets). Informationen über eventuelle Vertikalbewegungen (ausserhalb des Triplets) werden dabei ausschliesslich über GNSS erhalten.

Das IGN hat festgestellt, dass die HFP von den Endkunden vor allem in den Ortschaften benutzt werden. Punkte ausserhalb werden kaum genutzt. Deshalb werden die HFP nur noch in den Ortschaften wirklich unterhalten. Dabei werden in grösseren Ortschaften (mehr als 200 Einwohner) in einem mittleren Punktabstand von 5 km sogenannte Triplets erstellt. Das sind Gruppen von mehreren bestehenden (egal welcher Ordnung) oder neuen Nivellementpunkten. Der Bezug zum Höhennetz IGN69 erfolgt per Nivellement nur noch lokal innerhalb der Punktgruppe. Die einzelnen Punkte eines Triplets sollten maximal 1 km auseinanderliegen, und die Höhendifferenz sollte kleiner als 30 Meter sein. Die Verbindung der Triplets untereinander erfolgt nur noch über GNSS und über die Transformationsfläche RAFxx.



Für die Einrichtung der Triplets werden zunächst sogenannte Pivot-Stationen eingerichtet. Diese dauerhaft vermarkten GNSS-Nivellementpunkte liegen in der Nähe von stabilen Nivellementpunkten höherer Ordnung und haben eine gute GNSS-Sichtbarkeit. Sie liegen zudem maximal 5 km von einer RBF-Station (Réseau de Base Français, vergleichbar mit den Schweizer LV95-Punkten) entfernt, um möglichst kurze Baselines zu haben. Auf den Pivot-Stationen werden mindestens 48 Stunden GNSS-Messungen durchgeführt, und sie werden an mindestens 3 HFP per Nivellement angeschlossen.

Während der Messungen auf der Pivot-Station werden die umliegenden Triplets eingerichtet. Maximaldistanz Pivot-Triplet 15 km (max. Höhendifferenz 200 Meter). Dazu wird in der Umgebung der Triplets eine temporäre GNSS-Nivellementstation (PGV, Point GPS Village) eingerichtet (Dauer der GNSS-Messung: 3 Std.) und an die umliegenden HFP angeschlossen (nur eine Latte, hin und zurück).

Während der Messungen auf der Pivot-Station wird auch die nahegelegene RBF-Station für mindestens 2 Stunden beobachtet.

Die Auswertung der Pivot-GNSS-Messungen geschieht mit Bernese Software – zunächst relativ zu den GNSS-Permanentstationen (RGP, réseau GNSS permanent). Die GNSS-Schlusslösung aller PGV erfolgt mit fixierter RBF-Station. Die Normalhöhe des PGV wird durch Anbringen der Transformationsfläche RAFxx erhalten. Bei bestehenden GNSS-Nivellement-Residuen auf der Pivot-Station erhält der Nivellementanschluss Priorität, und das ganze lokale Netz wird um den entsprechenden Offset verschoben.

So ergeben sich natürlich auch Differenzen auf den Triplet-Punkten zwischen den publizierten IGN69-Höhen und den mit GNSS (+RAF) bestimmten Höhen. Diese werden durch ein gewichtetes Mittel korrigiert (Genauigkeit Nivellement: 2 mm, publizierte Höhen IGN69: 5 mm, GNSS-Höhe: 1 cm).

6.4.2. Quasigeoidmodelle / Höhentransformation

In Frankreich wird zwischen Geoidmodellen und Höhentransformationsflächen unterschieden. Alle Modelle werden vom IGN berechnet und den Benutzern gratis zur Verfügung gestellt.

Die Geoidmodelle (Bezeichnung QGFxx) sind rein gravimetrische Modelle. Die letzten Modelle sind QGF98 und QGF2016.

Die Höhentransformationsflächen (Bezeichnung RAFxx, Références des Altitudes Françaises) sind das auf die GPS-Nivellementpunkte eingezwängte Quasigeoid (lineare Transformation plus Kollokation). Es erlaubt die Transformation zwischen ellipsoidischen Höhen RGF93 (entspricht ETRF) und Normalhöhen IGN69. Das aktuelle Modell ist RAF2018b. Vorgänger waren RAF98, RAF09 und RAF2018.

6.4.3. Der Beitrag Frankreichs an UELN

Der klassische Beitrag Frankreichs ans europäische Nivellement UELN sind die Linien erster Ordnung des IGN69, wobei nur die Potentialdifferenzen zwischen den Knotenpunkten geliefert wurden. Dazu kamen noch ein paar wenige Linien niedriger Ordnung für Auslandanschlüsse (z.B. Mont-Blanc-Tunnel). Zur Schweiz bestehen nur die beiden Anschlüsse in Basel und Genf.

Die französischen Daten verursachten immer ziemlich grosse Probleme wegen der vorhandenen systematischen Fehler. Das war einer der Hauptgründe für die Messung des NIREF. In der letzten Berechnung des UELN (EVRF2019) sind nun erstmals die NIREF-Daten enthalten – zusätzlich zur in den 1990er Jahren wiederholten Linien 1. Ordnung im Norden. Das ist aber immer noch ein sehr grobmaschiger Datensatz mit nur wenig Überbestimmung und sehr wenigen Verknüpfungspunkten zum Ausland. Deshalb hat man auch das gesamte alte Netz 1. Ordnung in NIREF eingezwängt und an EUREF geliefert. An einem Transformationsdatensatz zwischen NIREF und IGN69 wird noch gearbeitet.



6.5. Österreich

6.5.1. Das offizielle Höhensystem

Das Höhensystem wird offiziell als «sphäroidische Höhen des MGI» bezeichnet (MGI = Militärgeographisches Institut). Die Verwendung des Begriffs «österreichische Gebrauchshöhen» ist aber auch üblich.

Sphäroidische Höhen sind identisch mit normal-orthometrischen Höhen. Das heisst, dass für die Schwere reduktion nur (theoretische) Normalschweren verwendet werden, also nur der Einfluss der Abplattung des Ellipsoids (Sphäroids) berücksichtigt wird.

Als Nullpunkt wurde das Mittelwasser der Adria des Pegels in Triest im Jahre 1875 gewählt. Deshalb werden österreichische Höhen auch mit H.ü.A. (Höhen über Adria) angegeben. Da der Pegel in Triest nicht mehr verwendet werden kann, dient der Punkt Hutbiegel (nordwestlich von Wien) heute als ideeller Nullpunkt.

Die Erstmessung des österreichischen Nivellements erfolgte zwischen 1873 und 1895 (mit Ergänzungen bis 1912).

Wiederholungsmessungen des Netzes erfolgten ab 1948. An der Definition des Höhensystems wurde aber nichts geändert. Das Netz besteht aus einem PN (Präzisionsnivellement) 1. Ordnung und einem PN 2. Ordnung. Die Genauigkeit wird vom BEV mit 0,8 mm/km angegeben. Durch das jeweilige Einzwängen in die Knotenpunkte kommen aber Unsicherheiten von bis zu 2,0 mm/km hinzu. Seit 2018 werden keine systematischen Linienmessungen mehr durchgeführt, da nun alle wichtigen Linien mindestens zweimal seit 1948 beobachtet sind (Abschluss 2017 Grossglockner). Für ca. 5000 der insgesamt ca. 29 000 Fixpunkte liegen heute Informationen über Höhenänderungen vor. Seither werden fast nur noch lokale Nachführungen gemacht und zerstörte Punkte ersetzt.

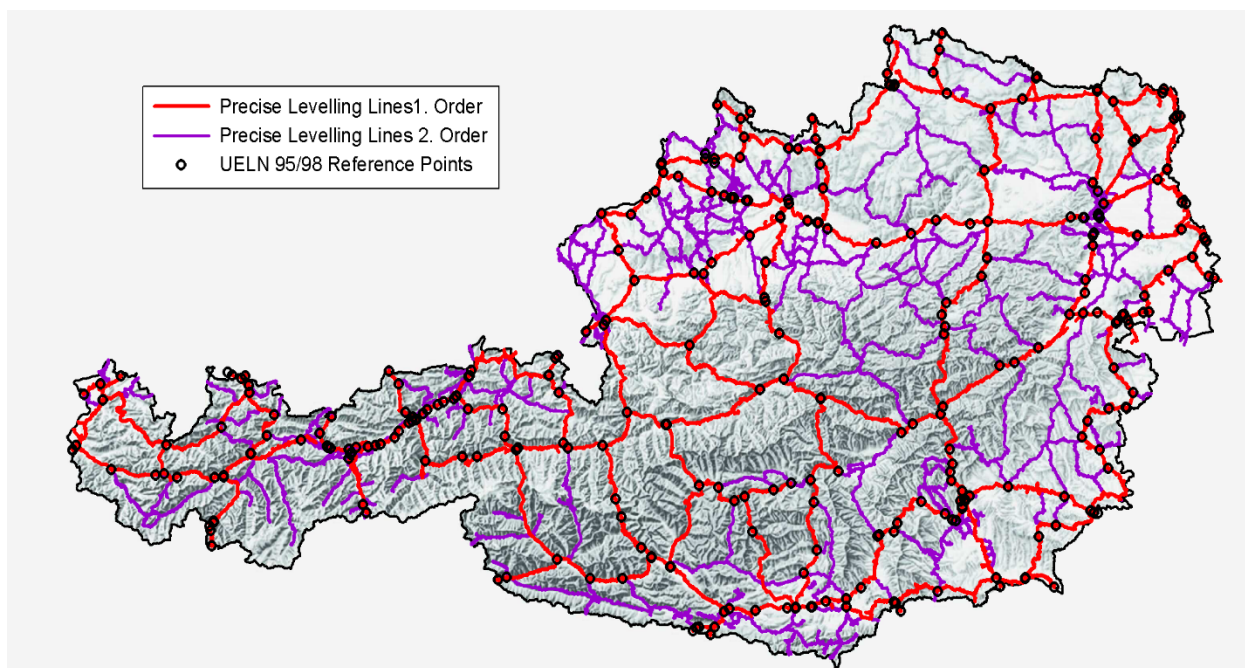


Abbildung 6-17: Das österreichische Nivellementnetz.

6.5.2. Orthometrische Höhen, Normalhöhen

Für die Berechnung von (nicht offiziellen) orthometrischen Höhen und Normalhöhen wird in Österreich von den geopotentiellen Knoten der Lösung UELN 95/98 des europäischen Nivellements aus gestartet. Diese Höhen beziehen sich also auf den Pegel Amsterdam. Für sämtliche Höhenfixpunkte liegen heute geopotentielle Knoten und orthometrische Höhen vor, welche nur auf Verlangen abgegeben werden.



6.5.3. Transformationen, Geoid

Für die Transformation zwischen Gebrauchshöhen und orthometrischen Höhen hat man in Österreich den schweizerischen Ansatz (*HTRANS*) praktisch unverändert übernommen. Das heisst, dass die Differenz in einen lageabhängigen Anteil (Gebrauchshöhen minus Normalhöhen) und einen höhenabhängigen Anteil (Normalhöhen minus orthometrische Höhen) aufgeteilt wird. Für die Abgabe an die Benutzer werden die beiden Anteile aber zu einem Gitter für die Erdoberfläche zusammengefasst. Diese Transformationsfläche hat eine Auflösung von 15x22 Bogensekunden (ca. 500 Meter).

Das aktuelle österreichische Geoidmodell stammt aus 2008 und wurde (wie schon die früheren Modelle) von der TU Graz berechnet. Es ist eine Kombination aus Lotabweichungen, Schweren und GNSS-Nivellement. Es wird als 2,5x1,5 Bogenminuten-Gitter (ca. 2,7 km) gratis an die Benutzer abgegeben (pro Bundesland).

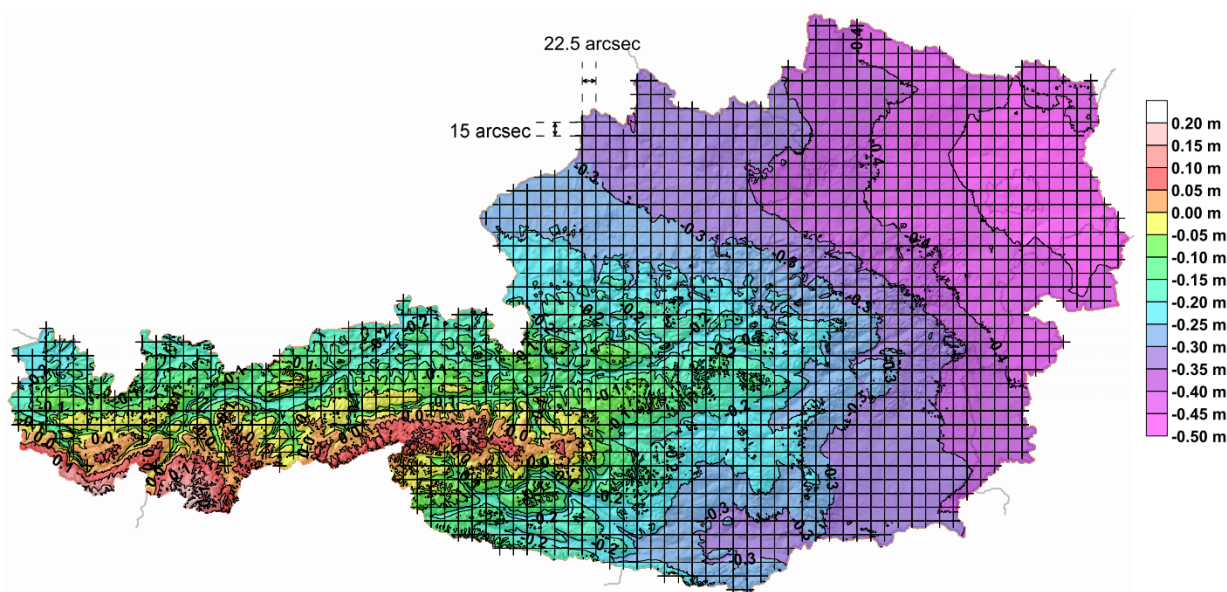


Abbildung 6-18: Differenzen Gebrauchshöhen (Adria) minus orthometrische Höhen (Amsterdam).

6.6. Italien

Das offizielle Höhensystem in Italien trägt den Namen «Rete di livellazione di alta precisione / Rete di livellazione fondamentale» (Di Sclafani et al., 2016). Dessen Kurzbezeichnung lautet «GE42» für «Genova 1942».

6.6.1. Geschichtliche Entwicklung

Das erste Präzisionsnivellement «Rete Antica» erfolgte zwischen 1878 bis ca. 1905. Es wurden ungefähr 7000 km (1. Ordnung) nivelliert, mit einem HFP etwa jeden Kilometer. Im Anschluss wurde ein Netz 2. Ordnung von ca. 15 000 km gemessen.

In den Jahren 1948–1971 wurde ein neues Netz unter dem Namen GE42 «Rete Moderna» gemessen: Dieses umfasst 36 geschlossene Polygone mit etwa 13 000 km. GE42 bezeichnet den Pegel von Genova im Jahr 1942. Offiziell wird GE42 als orthometrisches System bezeichnet; es wurden aber keine Schwerekorrekturen vorgenommen, womit es ein Gebrauchshöhensystem wie in der Schweiz ist.

Seit 1997 läuft die Zweitmessung des Netzes. Der Grund für die Neumessung waren insbesondere die vielen zerstörten Punkte. Der Netzaufbau folgt im Wesentlichen der Erstmessung. Es wurden aber einige Verdichtungslinien hinzugefügt. Dies ergibt eine totale Streckenlänge von ca. 22 000 km. Das Projekt ist



noch nicht ganz abgeschlossen. 2016 waren etwa 18 000 km gemessen. An der Definition des Höhensystems wurde nichts geändert und die Messungen wurden in relativ viele Werte des GE42 eingezwängt, was auch den Namen GE42(2019) erklärt (Genova 1942, Realisierung 2019).

GE42(1971) und GE42 (2019) weisen folgende Eckwerte auf:

System	GE42 (1971) «Rete Moderna»	GE42 (2019)
Messzeitraum	1948/1971	Seit 1997
Umfang	36 geschlossene Polygone, 100 Linien, 13 000 km (inkl. Auslandanschlüsse)	38 (Haupt-)Polygone, 22 000 km
Höhenfixpunkte	13 000 Punkte, mittlerer Punkt- abstand 1 km	22 000 Punkte, mittlerer Punkt- abstand 1 km
Nullpunkt	Pegel von Genova 1942 (Mittelwert der Messungen 1937–1946, Referenzdatum 1.1.1942).	Unverändert, Pegel von Genova
Höhensystem	Dem offiziell als orthometrisch bezeichneten System fehlt die Berücksichtigung der Gravimetrie. Es ist also ein Gebrauchshöhensystem wie LN02 in der Schweiz.	Unverändert, Gebrauchshöhensystem
Genauigkeit	1,3 mm/km	1,6 mm/km (Hauptlinien), 1,8 mm/km (Verdichtungslinien)

6.6.2. Aufbau von GE42

1940 erhielt das IGM den Auftrag, ein neues Höhennetz zu messen. Da viele alte Bolzen verschwunden waren, wurden Vertikalbewegungen zunehmend zum Problem.

Die Messungen begannen zwar 1941, aber wegen des Krieges sofort wieder gestoppt und konnten erst 1948 wiederaufgenommen werden. 1971 war das ganze Netz gemessen.

Das nationale Höhennetz besteht heute nur aus den Hauptlinien. Es gibt teilweise auch untergeordnete Linien, die von den Provinzen oder von privaten Organisationen unterhalten werden; diese sind aber nicht Bestandteil der Landesvermessung.

Für wissenschaftliche Zwecke und als Beitrag zu UELN wurden für das italienische Präzisionsnivellement ab 1955 auch Schweren gemessen (im Flachland alle 3 km, in den Bergen alle 1–2 km). 1972 waren auch alle Schweremessungen abgeschlossen (ca. 5000 Punkte). Auf den übrigen HFP wurde die Schwere interpoliert. Daraus wurden dann geopotentielle Höhen (und dynamische Höhen) berechnet, welche aber nie Anwendung in der Praxis fanden.

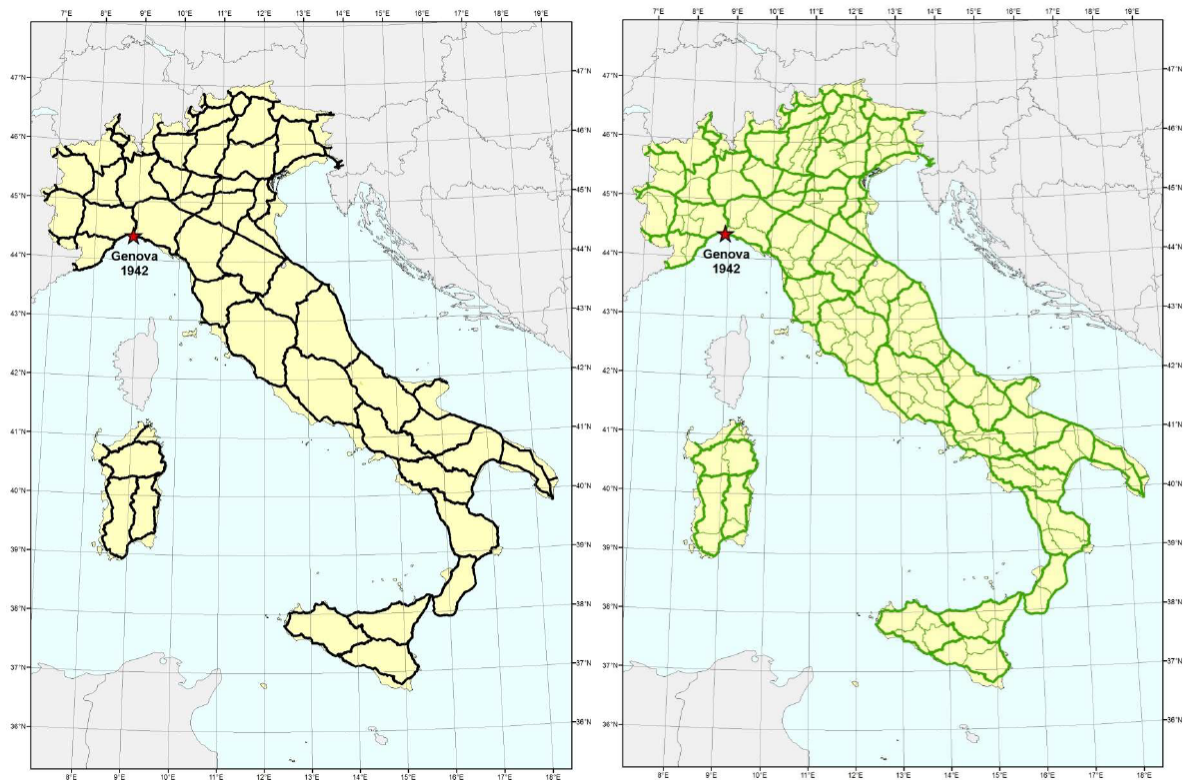


Abbildung 6-19: Hauptlinien des GE42 und Plan der Neumessungen.

6.6.3. Erneuerung des Netzes

1997 hat das IGM entschieden, das Netz zu erneuern. Das Hauptproblem waren die vielen zerstörten Punkte. Es sollten sämtliche bestehenden Linien neu gemessen und neue Verdichtungslinien eingerichtet werden. Insgesamt sollten etwa 22 000 km neu nivelliert werden. Ursprünglich sollte das Projekt bis 2013 abgeschlossen sein, aber es ist auch heute noch nicht ganz fertig (Status 2016: 18 000 km gemessen). In der Nähe der Schweiz sind jedoch alle Linien neu gemessen (ausser Bormio – Livigno – Punt dal Gall). In einigen Provinzen wurden die Messungen nicht vom IGM selbst durchgeführt, sondern an die Provinzen delegiert (unter exakter Anleitung und mit grosser finanzieller Beteiligung des IGM).

Es erfolgten keine systematischen neuen Schweremessungen. Die Werte wurden aus dem bestehenden Datensatz interpoliert. Einige Provinzen (z.B. Südtirol) haben aber Schweremessungen durchgeführt.

Das Höhensystem wird bei dieser Erneuerung nicht geändert. Italien wird weiterhin ein (statisches) Gebrauchshöhensystem betreiben. Relativ viele Punkte des alten Netzes wurden bei der Neuberechnung fixiert und die Neumessungen in diese Punkte eingezwängt. Dass das System nicht geändert wurde, sieht man auch am Namen, welcher GE42(2018) und, in anderen Dokumenten, GE42(2019) lautet.

Für wissenschaftliche Zwecke werden (in der Regel vom Politecnico di Milano) auch geopotentielle Koten, orthometrische Höhen und Normalhöhen berechnet.

6.6.4. Geoidmodelle

In Italien berechnet das «Politecnico di Milano» gravimetrische und hybride (mit GNSS-Nivellement) Quasi-geoidmodelle. Die letzten Modelle sind ItalGeo95, ItalGeo2000 (oder ItalGeo1999) sowie ItalGeo05. ItalGeo2020 ist in Arbeit. Vertrieben werden die Modelle durch das IGM.



Das heute offizielle Geoidmodell ist ItalGeo2005. Es gibt zwei Versionen davon: Die eine ist eine rein gravimetrische Lösung, die andere wurde auf die GPS-Nivellementpunkte adaptiert und erlaubt eine Transformation der offiziellen italienischen Höhen in ETRS89 mit einer Genauigkeit von ca. 3 cm. Die italienischen Geoidmodelle sind für den Endkunden kostenpflichtig.

Daneben gibt es noch das Modell GISGEO2012. Dieses entstand im grenzüberschreitenden Projekt HELIDEM (POLIMI/SUPSI/swisstopo) für das Grenzgebiet Schweiz/Italien.

6.6.5. Beitrag Italien an UELN

Italien lieferte die geopotentiellen Knoten aller Knotenpunkte und Auslandanschlüsse des ursprünglichen GE42(1971). 2018 wurde dann ein Teil der neu gemessenen Linien geschickt. Diese konnten teilweise dann noch für die Berechnung von EVRF2019 berücksichtigt werden.

6.7. Neuseeland

Das neuseeländische Höhensystem ist NZVD2016. Die Informationen in diesem Kapitel stammen aus Amos (2010) sowie von der offiziellen Webseite des neuseeländischen Höhensystems⁸.

6.7.1. Das ursprüngliche System

Traditionell hatte Neuseeland nie ein nationales Höhensystem, sondern insgesamt 13 lokale Höhensysteme (LVD, local vertical datum), welche auf lokalen Pegelmessungen basierten.

Die Pegelstationen sind teilweise in Flussmündungen und deshalb nicht besonders gut geeignet, um den mittleren Meeresspiegel zu reflektieren. Das führte auch zu Offsets zwischen den einzelnen LVD von teilweise mehreren Dezimetern.

Das Präzisions-Nivellementnetz umfasst insgesamt ca. 16 000 km. Die mittlere Genauigkeit liegt bei 2 mm/km. Gemessen wurde ca. ab 1960. Verdichtet wurde das Netz durch trigonometrisches Nivellement und barometrische Höhenbestimmung in besonders schwierig zugänglichen Regionen.

Es wurden keine Schweremessungen durchgeführt, aber normal-orthometrische Korrekturen angebracht.

Teilweise wurden die Teilnetze untereinander verknüpft. Verknüpfungspunkte erhielten dann zwei verschiedenen Höhen. Wegen Messfehlern und der angewendeten normal-orthometrischen Korrektur gab es zwischen den Teilnetzen nicht nur einen simplen Offset, was die Vereinigung der LVD zu einem nationalen System verunmöglichte.

⁸ <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/datums-projections-and-heights/vertical-datums/new-zealand-vertical-datum-2016-nzvd2016>

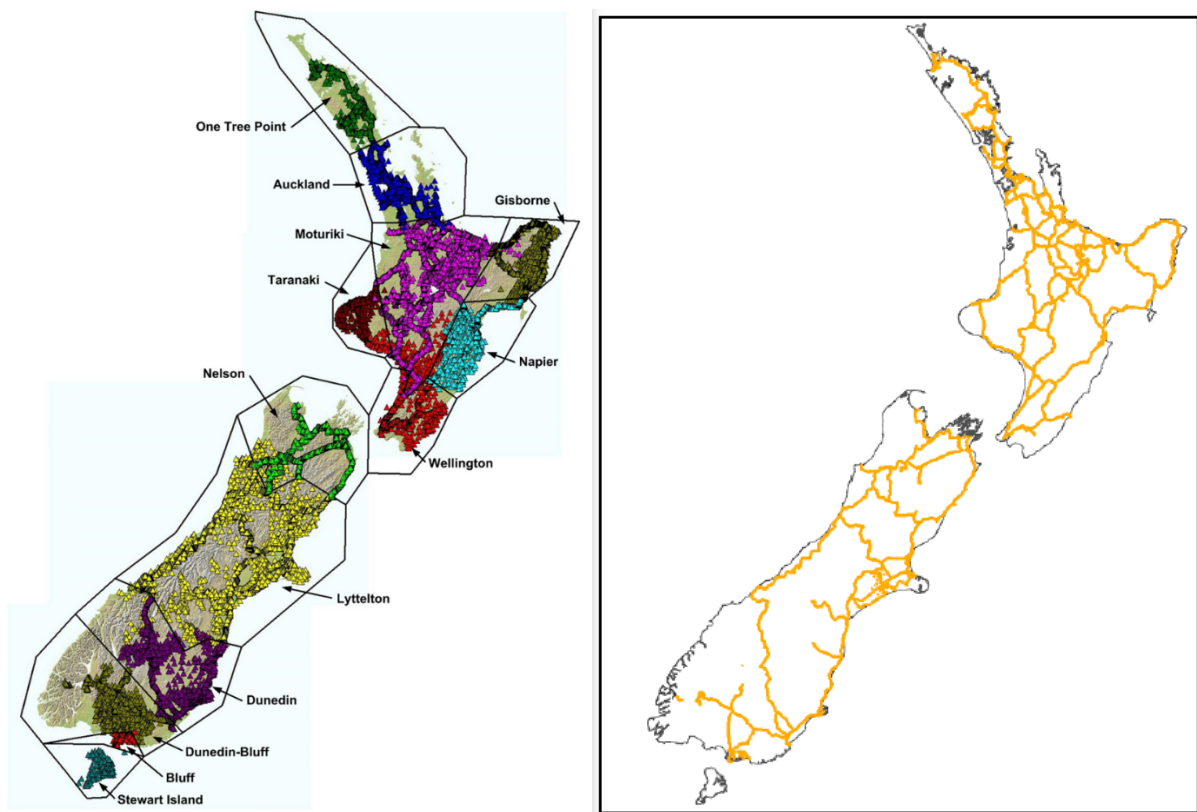


Abbildung 6-20: Lokale Höhensysteme (LVD) vor 2009 und Nivellementnetz.

Neuseeland ist eine tektonisch sehr aktive Region. Erdbeben und Vulkanausbrüche, aber auch anthropogene Aktivitäten (Extraktion für Geothermie) verursachen teilweise Höhenänderungen von mehreren Metern. Die rein durch tektonische Aktivitäten langfristig verursachte Bewegungen liegen in der Grössenordnung von 1 cm/Jahr. Diese Höhenänderungen sind auf nationalem Niveau sehr wenig bekannt. Die Bestimmung von Vertikalbewegungen erfolgt praktisch ausschliesslich mit GNSS.

Diese Bewegungen verursachen eine starke Reduzierung des Wertes des Nivellements bereits nach wenigen Jahren.

Ab den 1990er-Jahren wurden etwa 1400 GPS-Nivellementpunkte gemessen. Das Hauptziel war vor allem die Nutzbarmachung von GNSS für die praktische Vermessung. Das Ziel der Bestimmung von Transformationsflächen zwischen den LVDs und ellipsoidischen Höhen scheiterte aber an den Vertikalbewegungen (langfristige Hebung oder plötzliche Sprünge durch Erdbeben?).

Dies führte zu einem grundlegenden Neuaufbau des Höhensystems.

6.7.2. NZVD2009

Eine Neumessung des Nivellementnetzes kam schon aus Kostengründen nicht in Frage. Aber auch wegen der Vertikalbewegungen würde das Nivellement nach wenigen Jahren seinen Wert wieder verlieren. Zudem sollte das Höhensystem auch in abgelegenen Gegenden zugänglich sein, was mit Nivellement nicht zu erreichen war.

Deshalb wurde entschieden, das neue Höhensystem allein auf ein Geoidmodell (und ellipsoidische Höhen) abzustützen. Eine wichtige Idee war dabei, dass sich Vertikalbewegungen vor allem auf physikalische und ellipsoidische Höhen auswirken, und sich das Geoid durch Erdbeben und andere tektonische Bewegungen praktisch nicht ändert.

Das war das erste nationale Höhensystem in Neuseeland, und es war das erste Land weltweit, welches allein ein Geoid zur Definition des Höhensystems einführte.



NZVD2009 bleibt grundsätzlich ein normal-orthometrisches System. Das heisst, dass bei lokalen Nivellements weiterhin die normal-orthometrische Korrektur angebracht wird.

Als eigentliche Bezugsfläche für die Höhenbestimmung dient aber das Quasigeoidmodell NZGeoid2009. Dieses ist zwar kompatibel zu Normalhöhen, aber nach Aussage der Autoren sind die Differenzen zumindest lokal gegenüber einem normal-orthometrischen System vernachlässigbar.

Für die Höhenbestimmung muss nun zunächst auf einem bekannten Anschlusspunkt eine aktuelle ellipsoide Höhe bestimmt werden.

Die Transformation in die älteren LVDs wird durch einfache konstante Offsets realisiert.

Die LVDs und NZD2009 durften von den lokalen Behörden parallel benutzt werden.

6.7.3. NZVD2016

NZVD2016 ist seit 2016 das offizielle Höhensystem Neuseelands.

Grund für die Erneuerung waren einige Schwachpunkte des NZVD2009 – insbesondere die Genauigkeit des Geoidmodells NZGeoid2009. Die vorhandenen Schweremessungen waren teilweise alt und sehr unregelmässig verteilt. Zudem war der einfache Offset zur Transformation zu den LVDs zu ungenau.

Deshalb wurde entschieden, das ganze Land durch Fluggravimetrie mit aktuellen Schweremessungen zu versehen. Dazu wurden 2013–2014 insgesamt 50 000 km Fluglinien geflogen.

Dies führte zu einem verbesserten Quasigeoidmodell NZGeoid2016 mit einer Genauigkeit von ca. 3 cm.

Die Transformation zu den LVDs erfolgt nun über gekippte Ebenen, was im Grossteil des Landes eine Transformationsgenauigkeit von 1–2 cm ergibt.

NZVD2016 ist weiterhin ein normal-orthometrisches System.



Abbildung 6-21: Aerogravimetrie Neuseeland 2013–2014.



6.8. Schweden

Dieses Kapitel basiert hauptsächlich auf *Svensson et al. (2006)*.

6.8.1. Definition des Höhenbezugssystems

Das schwedische Höhensystem (RH2000) ist bis auf wenige Unterschiede eine Realisierung des European Vertical Altimetry System (EVRS) zum Zeitpunkt $t = 2000.0$. Es ersetzt das alte amtliche System RH70, das auf Nivellementmessungen von 1951 bis 1967⁹ basiert.

Bei RH2000 handelt es sich um ein Zero-Tide Normalhöhenystem. Der Bezug auf das Nullpotential $W_{0,EVRS}$ erfolgte indirekt durch die Anbindung des Nivellementnetzes an den Pegel von Amsterdam (NAP, Normaal Amsterdam Peil). Die Systemdefinition von RH2000 (die eher ein Bezugsrahmen ist) ist streng genommen keine Realisierung des EVRS-Systems, da zwei zusätzliche spezifische Definitionen hinzugefügt wurden:

1. Eine Referenzeпоche wurde definiert ($t = 2000.0$).
2. Ein Post-Glacial-Uplift-Modell (NKG2005LU) wird angebracht, um die Messungen auf die Referenzzeit ($t = 2000.0$) zu reduzieren. Das Post-Glacial-Uplift-Modell (NKG2005LU) ist eine Kombination aus einem geophysikalischen und einem auf geodätischen Messungen basierenden Modell. Konkret ist das Endprodukt ein Gitter aus vertikalen Geschwindigkeiten über die Gesamtheit der nordischen Länder.

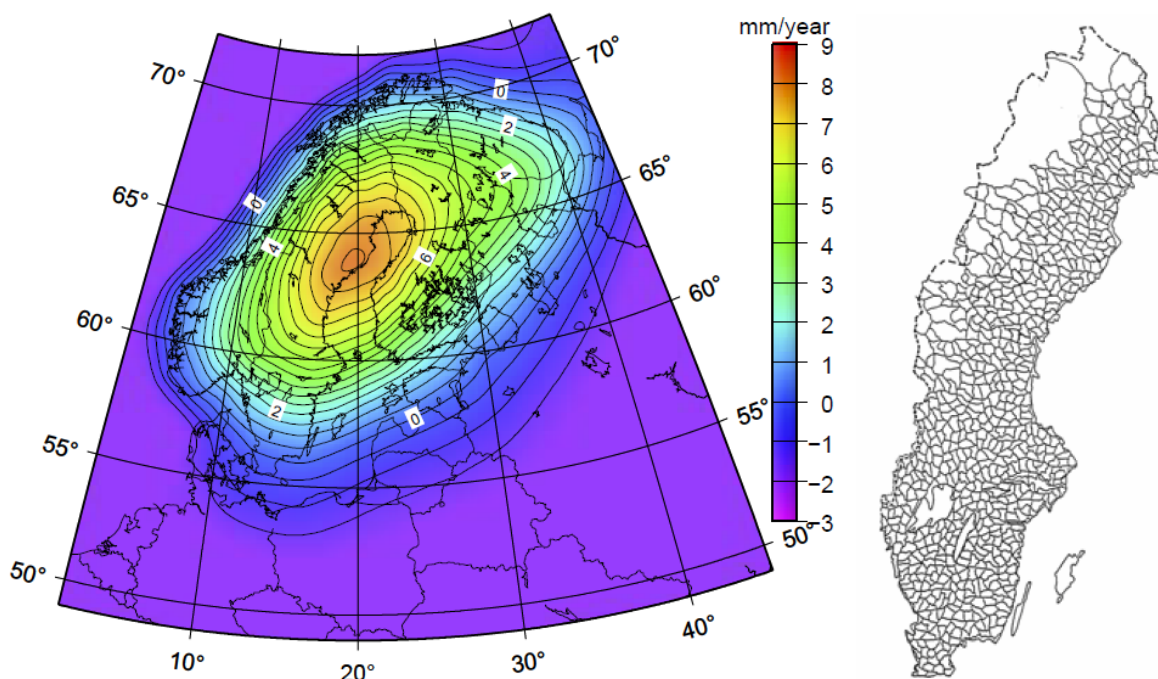


Abbildung 6-22: Vertikalverschiebungen nach dem kinematischen Modell NKG2005LU, in mm/Jahr (links) und Netz des dritten Präzisionsnivellements, 1979 - 2003 (rechts). Quelle: Svensson et al. (2006).

⁹ <https://www.lantmateriet.se/contentassets/4202802253364edca62359a102390999/overview-of-swedish-reference-systems.pdf> (28.04.2022)



6.8.2. Messungen und Anpassung von RH2000

Der Bezugsrahmen RH2000 ist eine Bestimmung der Normalhöhen von etwa 50 000 materialisierten Punkten. Diese Höhen wurden ausschliesslich aus Messungen des motorisierten Nivellements bestimmt, die zwischen 1979 und 2003 durchgeführt wurden (Mit einer ausgewiesenen Genauigkeit von $1\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$). Die Lagerung erfolgte auf die geopotentiellen Koten, die aus dem motorisierten Nivellement und den gravimetrischen Messungen abgeleitet wurden. Die Art der gravimetrischen Messungen wird nicht angegeben

6.8.3. Quasigeoidmodell

Ein Quasigeoidmodell (SWEN 05LR) wurde mit dem Höhensystem RH2000 veröffentlicht. Dies, um RH2000 Normalhöhen über die ellipsoidischen (GNSS)-Höhen des schwedischen lokalen Bezugssystems SWEREF99 bestimmen zu können. Dieses Quasigeoidmodell wurde mittels Kollokation nach den kleinsten Quadraten berechnet. Ein rein gravimetrischen Quasigeoidmodell (NKG 2004) wurde zu diesem Zweck auf einen Satz von 1178 Höhenanomalien gelagert, die durch GNSS-Nivellement bestimmt wurden:

$$\zeta = h_{\text{SWEREF99}} - H_{\text{RH2000}} \quad (6.3)$$

Somit wäre es korrekter, das Quasigeoidmodell (SWEN 05LR) als Höhenreferenzmodell zu bezeichnen. Die angegebene Genauigkeit beträgt 3-4 cm, in Bergregionen wahrscheinlich mehr.

6.8.4. Implementierung des neuen Systems RH2000 (Status 2006)

Es gibt eine beträchtliche Anzahl an lokalen Höhenreferenzsystemen. Praktisch jede Gemeinde hat ihr eigenes System. Von 290 Gemeinden haben 4 das System RH2000 eingeführt, 45 prüfen derzeit die Umstellung auf RH2000. Der Trend scheint dahin zu gehen, dass immer mehr Gemeinden RH2000 einführen. Dazu ist es jedoch unerlässlich, dass das Vermessungsamt zumindest die Werkzeuge bereitstellt, um die örtlichen Höhenangaben in RH2000 umzuwandeln.



6.9. Zusammenfassung

Land	System	Referenz / Pegel	Gezeitsystem	Höhenarten	Realisierung	Kinematisches Modell	Geoid-/Quasigeoidmodell	Dissemination	Kompatibilität
USA	NAPGD2022	W ₀ fixiert	Tide-Free	Orthometrisch	Rein gravimetrisches Geoid, inkl. Aerogravimetrie	Ja, inkl. kinematisches Geoid	Gravimetrisches Geoid	Einzig mittels GNSS	-
Norwegen	NN2000	Amsterdam	Zero-Tide	Normal	Nivellement	Ja, Post-Glacial-Uplift-Modell NKG2005LU	HREF ¹	Fixpunkte und GNSS	RH2000, N2000
Deutschland	DHHN2016	Amsterdam	Mean-Tide	Normal	Nivellement	Nein	GCG2016 (HREF ¹)	Fixpunkte und GNSS	EVRF2000
Frankreich	NGF-IGN69	Marseilles	Nicht definiert (Mean-Tide)	Normal	Nivellement, Nachführung mit GNSS/Quasigeoid	Nein	RAF2018b (HREF ¹)	Fixpunkte und GNSS	-
Österreich	IGM	Triest	Nicht definiert (Mean-Tide)	Normal-orthometrisch	Nivellement	Informationen über Vertikalbewegungen sind vorhanden, werden aber bei den offiziellen Höhen nicht angebracht	Geoid 2008 (GEOAUT) und HREF ¹ für die Normalhöhen	Fixpunkte und GNSS	-
Italien	GE42 (2019)	Genua	Nicht definiert (Mean-Tide)	Gebrauchshöhen	Nivellement	Nein	Gravimetrisches Geoid Ital-Geo2005 und HREF ¹	Fixpunkte und GNSS	-
Neuseeland	NZVD2016	NZGeoid2016	Nicht definiert (Mean-Tide)	Normal-orthometrisch ²	Rein gravimetrisches Geoid, inkl. Aerogravimetrie	Annahme eines statischen Geoids, die Punkte haben keine fixe Höhe	Gravitationsquasigeoid	Einzig mittels GNSS	-
Schweden	RH2000	Amsterdam	Zero-Tide	Normal	Nivellement	Ja, Post-Glacial-Uplift-Modell NKG2005LU	SWEN 05LR (HREF ¹)	Fixpunkte und GNSS (im Bericht nicht explizit erwähnt)	EVRF2000

¹HREF = *Height Reference Surface* = Geoid oder Quasigeoid, nicht rein gravimetrisch (meistens an Nivellementmessungen angepasst).

²Lokal sind die Unterschiede zu Normalhöhen (aus dem Quasigeoid) vernachlässigbar (laut Autoren).



7. Schlussfolgerungen

Von den verschiedenen Höhenarten, die im Kapitel 2 vorgestellt werden, erfüllen nur die physikalischen Höhen die Anforderungen an ein modernes Höhensystem. Von den physikalischen Höhen entsprechen die orthometrischen Höhen und die Normalhöhen am ehesten den heutigen praktischen und theoretischen Anforderungen.

So oder so wird ein modernes Höhenbezugssystem auf geopotentiellen Koten basieren, aus denen sowohl Normalhöhen als auch orthometrische Höhen abgeleitet werden können. Andere theoretische Aspekte der Definition eines Höhenbezugssystems, wie z. B. das Gezeitsystem, haben nur geringe Auswirkungen auf die Nutzerinnen und Nutzer, müssen aber streng definiert werden, um Kompatibilitätsprobleme mit internationalen Bezugssystemen zu vermeiden.

7.1. Das Schweizer Höhenreferenzsystem

Das offizielle, in der Schweiz geltende Höhensystem ist LN02. Die offiziellen Höhen basieren auf Nivellementmessungen, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts durchgeführt wurden. Diese Höhen weisen Differenzen von 20 bis 40 cm zu den orthometrischen Höhen LHN95 auf. LHN95 ist ein physikalisches Höhensystem, das auf geopotentiellen Höhenwerten beruht. LHN95 wurde jedoch nie offiziell eingeführt.

7.2. Europäische und globale Höhenreferenzsysteme

Derzeit laufen mehrere internationale Initiativen zur Vereinheitlichung der Höhensysteme. Das europäische vertikale Bezugssystem (EVRS) basiert auf dem Austausch von Nivellementdaten und einer zentralen Berechnung beim BKG. Das Internationale Höhenreferenzsystem (IHRs) verfolgt einen anderen Ansatz. Unter der Leitung der *International Association of Geodesy (IAG)* einigen sich die Mitgliedstaaten auf numerische Standards und Berechnungskonventionen, die es jedem Land ermöglichen, Höhen im IHRs zu realisieren. Globale Geoidmodelle sind eine wichtige Komponente zu diesem Zweck.

7.3. Internationaler Vergleich

Eine Reihe von Ländern hat in letzter Zeit ihr Höhenbezugssystem oder ihren Höhenbezugsrahmen geändert. Die Ziele dieser Änderungen sind die Vereinheitlichung und die Verbesserung der Genauigkeit. So haben die USA ein einheitliches Höhensystem eingeführt, das alle nationalen Hoheitsgebiete abdeckt. Die meisten Länder, die kürzlich umgestellt haben, entscheiden sich für Normalhöhen. Je nach den nationalen Besonderheiten stützt sich die Realisierung auf Nivellementmessungen.

Sowohl Neuseeland als auch die USA haben bei der Realisierung ihrer Systeme ganz auf Nivellementmessungen verzichtet. In Neuseeland sind die kinematischen Effekte so stark, dass die ersten Nivellementmessungen bereits nach einigen Jahren, also potenziell noch vor Abschluss der vollständigen Vermessung des Netzes, überholt wären. Es wird davon ausgegangen, dass die Kinematik nur die ellipsoidischen Höhen beeinflusst und nicht die Geoidundulationen, die als statisch angenommen werden.

In den USA sind die Kosten für die Vermessung und Instandhaltung des Nivellementnetzes das Hauptargument für den Verzicht auf ein nationales Nivellement. Ausserdem lassen sich die Überseegebiete durch terrestrische Messungen nicht anschliessen. Um das Gebiet mit ausreichender räumlicher Dichte zu beproben, werden aerogravimetrische Messungen durchgeführt.

Ein kinematisches Modell in der einen oder anderen Form wird auch von den meisten Ländern in Betracht gezogen, die kürzlich zu einem neuen System oder Rahmen übergegangen sind. Entweder hat sich ein kinematisches Modell aufgrund der starken Kinematik auf natürliche Weise durchgesetzt, wie in den nördlichen Ländern, oder es werden Argumente für die Langlebigkeit des Bezugsrahmens angeführt.





8. Empfehlungen

Die Arbeitsgruppe empfiehlt, die Arbeiten im Zusammenhang mit einer Umstellung des Schweizerischen Höhenreferenzsystems fortzusetzen. Die nächsten Schritte sind:

1. Festlegung der strategischen Ausrichtung zur Verfeinerung des LHN95-Systems oder zur Entwicklung eines neuen Höhensystems in enger Abstimmung mit europäischen oder internationalen Standards.
2. Falls man sich für die Entwicklung eines neuen Höhenreferenzsystems entscheidet: Prüfung und Definition der numerischen Konventionen für das zukünftige Schweizer Höhenreferenzsystem.
3. Beurteilung und Test wissenschaftlicher Software, insbesondere für die Geoidberechnung. Korrekte Implementierung der gewählten numerischen Konventionen (LHN95 oder neues System) in die Software zur Bestimmung des Geoids.
4. Entwicklung eines strategischen Konzepts zur Realisierung des neuen Höhenbezugsrahmens unter Gewährleistung einer guten Punktverteilung, einer angemessenen Dichte und einer effizienten Instandhaltung.
5. Entwicklung der Methodik für die Höhentransformation in das neue System, inkl. Schätzung der Genauigkeit der transformierten Höhen.
6. Konzeptstudie für die digitale Modellierung von Lage- und Höheninformationen, um die Referenzsysteme/-rahmen und Epochen der Koordinaten- und Höhenbestimmung in der Schweiz systematisch und effizient zu verwalten. Die Strategien für die dynamische Verwaltung von Lage- und Höheninformationen sollen hingegen erst später festgelegt werden.

Diese Arbeiten können parallel zur Bewertung, durch die HEIG-VD, des Nutzen-Kosten-Verhältnisses eines Wechsels des Höhenbezugssystems durchgeführt werden. Dieses Kosten-Nutzen-Verhältnis ist ausschlaggebend für die Entscheidung, ob das offizielle Höhenbezugssystem in der Schweiz gewechselt werden soll oder nicht.

Auch wenn das neue System nicht als offizielles System eingeführt werden sollte, werden die vorgeschlagenen Arbeiten für swisstopo von Nutzen sein. Sie werden es ermöglichen, das wissenschaftliche Höhenbezugssystem (derzeit LHN95) zu modernisieren und damit um die Aufrechterhaltung des offiziellen Systems, die Bestimmung des Geoids, grössere Infrastrukturarbeiten oder wissenschaftliche Anwendungen unterstützen.





Bibliografie

- AdV. (2018). Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes und der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug 2016. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.
- Amos M. (2010). New Zealand Vertical Datum 2009. New Zealand Surveyor, No. 300.
- Angermann D, Gruber T, Gerstl M, Heinkelmann R, Hugentobler U, Sánchez L, Steigenberger P. (2020). Bureau of Products and Standards: Inventory of standards and conventions used for the generation of IAG products. The Geodesists Handbook 2020. Journal of Geodesy, 94, 221–223.
- Commission Géopositionnement. (2016). Rapport Final du Groupe de Travail sur la révision du décret de 2006 sur les références géodésiques. Conseil national de l'information géographique.
- Di Sclafani N, Maseroli R, Palmieri F, Russo P. (2016). Determinazione delle reti altimetriche nella provincia autonoma di Bolzano. Bollettino della società italiana di fotogrammetria e topografia, 23-35.
- Ehrensperger W, Kok JJ. (1986). Status and Results of the 1986 Adjustment of the United European Levelling Network - UELN - 73. In: Pelzer H, Niemeier W (eds), Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, University of Hannover.
- Ekman M. (1979). The stationary effect of moon and sun upon the gravity of the earth, and some aspects of the definition of gravity. Uppsala University, Geodetic Institute, Report 5.
- Ekman M. (1989). Impacts of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. Bulletin géodésique, 63, 281-296.
- Ekman M. (1996). The permanent problem of the permanent tide: What to do with it in geodetic reference systems? Marées terrestres (Bruxelles), 125, 9508-9513.
- Grotti J, Koller S, Vogt S, Häfner S, Sterr U, Lisdat C, Denker H, Voigt C, Timmen L, Rolland A, Baynes FN, Margolis HS, Zampaolo M, Thoumany P, Pizzocaro M, Rauf B, Bregolin F, Tampellini A, Barbieri P, Zucco M, Costanzo GA, Clivati C, Levi F, Calonico D. (2018). Geodesy and metrology with a transportable optical clock. Nature Physics, 14, 437-441. doi: <https://doi.org/10.1038/s41567-017-0042-3>.
- Hilfiker J. (1902). Untersuchung der Höhenverhältnisse der Schweiz im Anschluss an den Meereshorizont. Landestopographie L+T, Bern.
- Hirsch A, Plantamour E. (1891). Nivellement de précision de la Suisse / exécuté par la Commission géodésique fédérale ; sous la dir. de A. Hirsch et E. Plantamour. H. Georg, Genève.
- Ihde J, Augath W. (2003). The Vertical Reference System für Europe. In: Annoni A, Luzet C, Gubler E, Ihde J (eds), Map Projections for Europe. Institute for Environment and Sustainability, European Communities 2003.
- Ihde J, Augath W, Sacher M. (2002). The vertical reference system for Europe. In: Vertical Reference Systems. Springer, pp. 345-350.
- Ihde J, Mäkinen J, Sacher M. (2008). Conventions for the definition and realization of a european vertical reference system (EVRS). EVRS conventions 2007.
- International Association of Geodesy. (2015). Resolution 1: Definition and Realization of an International Height Reference System (IHRs) In: IAG Resolutions adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly, Prague.
- Lysaker DI, Vestøl O. (2020). The Norwegian vertical reference frame NN2000. In: Norwegian Mapping Authority (ed), Technical report of the Norwegian Mapping Authority.
- Marti U. (2016). Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95' - Das Geoid der Schweiz 2004 „CHGeo2004“. Federal Office of Topography, Wabern, Switzerland.
- Moritz H, Hofmann-Wellenhorst B. (2006). Physical geodesy. Springer, Wien, New York.
- National Geodetic Survey. (2017a). Blueprint for 2022, Part 1: Geometric Coordinates. In: NOAA (ed), NOAA Technical Report.
- National Geodetic Survey. (2017b). Blueprint for 2022, Part 2: Geopotential Coordinates. In: NOAA (ed), NOAA Technical Report.



National Geodetic Survey. (2019). Blueprint for 2022, Part 3: Working in the Modernized NSRS. In: NOAA (ed), NOAA Technical Report.

Remmer O. (1986). The United European Levelling Network – Present State and Future Plans. In: Pelzer H, Niemeier W (eds), Symposium on Height Determination and Recent Vertical Crustal Movements in Western Europe. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, University of Hannover.

Saaranen V, Lehmuskoski P, Rouhiainen P, Takalo M, Mäkinen J. (2007). The new Finnish height system N2000. In: Proceeding of the EUREF Symposium, Riga, 14–17 June 2006.

Sacher M, Ihde J, Liebsch G, Mäkinen J. (2008). EVRF2007 as Realization of the European Vertical Reference System. In: Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF). EUREF, Brussels, pp. 25 - 50.

Sacher M, Lang H, Ihde J. (1999). Status and Results of the Adjustment and Enlargement of the United European Levelling Network 1995 (UELN-95). EUREF Publication No. 7.

Sacher M, Liebsch G. (2019). EVRF2019 as new realization of EVRS. In: Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). EUREF, Tallinn.

Sánchez L, Ågren J, Huang J, Wang YM, Mäkinen J, Pail R, Barzaghi R, Vergos GS, Ahlgren K, Liu Q. (2021). Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRs). Journal of Geodesy, 95, 33. doi: 10.1007/s00190-021-01481-0.

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

Schlatter A, Brockmann E, Signer T, Wiget A, Wysser K. (2001). Konzept- und Machbarkeitsstudie zu HFP2-Netzen im heutigen Umfeld. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik VPK, 99, 169 - 175.

Schlatter A, Marti U. (2007). Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95'. Teil 12: Landeshöhennetz 'LHN95': Konzept, Referenzsystem, kinematische Gesamtausgleichung und Bezug zum Landesnivellement 'LN02'. In: Berichte aus der L+T (Landestopografie), Wabern, Switzerland.

Schlatter A, Mattli B, Kistler M. (2005). CHGeoid2003: GPS/Nivellement Rekognoszierung, Versicherung, Nivellement-Anschlussmessungen und Punktdokumentation. swisstopo, Wabern.

Schneider D, Gubler E, Marti U, Gurtner W. (1995). Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz 'LV95' - Terrestrische Bezugssysteme und Bezugsrahmen. Federal Office of Topography, Wabern, Switzerland.

Svensson R, Ågren J, Olsson P-A, Eriksson P-O, Lilje M. (2006). The New Swedish Height System RH 2000 and Geoid Model SWEN 05LR. In: XXIII FIG Congress. FIG, Munich, Germany.

Torge W, Müller J. (2012). Geodesy. de Gruyter.

Vanicek P, Krakiwski E. (1986). Geodesy: the Concepts. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

Wicki F, Signer T, Messmer W. (2002). Das Höhensystem für die amtliche Vermessung und weitere raumbezogene Daten. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 100, 2.

Wirth B. (1990). Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveauflächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrischen und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich, Switzerland.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung. 2-1: Ellipsoidische Höhe h eines Punktes P , orthometrische Höhe H und Geoidundulation N an diesem Punkt.	11
Abbildung. 2-2: Beziehung zwischen Oberfläche, Telluroid und Ellipsoid (links) und zwischen Oberfläche, Quasigeoid und Ellipsoid (rechts). Quelle: Moritz and Hofmann-Wellenhof (2006).	13
Abbildung 2-3: Unterschied zwischen einer normalen Mean-Tide-Höhe und einer normalen Zero-Tide-Höhe nach den EVRF-Konventionen.	17
Abbildung 3-1: Präzisionsnivellement der Schweiz (Hirsch & Plantamour, 1891).	23
Abbildung 3-2: Differenzen zwischen den Höhen des Catalogue des Hauteurs und des Versicherungsnivellements zu den aktuellen Gebrauchshöhen LN02 der noch bestehenden Fixpunkte 1. Ordnung des Nivellement de Précision Stand 2002 (Schlatter, 2007). Die grossen Balken repräsentieren instabile Punkte.	25
Abbildung 3-3: Vergleich zwischen den offiziellen Gebrauchshöhen LN02, dem Nivellement de précision (NdP), dem Versicherungsnivellement (VN) und den beobachteten Nivellementhöhen entlang der Landesnivellement-(LN)-Linien Genève (RPN) – Martigny – Brig.	26
Abbildung 3-4: Die Präzisionsmessungen im schweizerischen Landesnivellement von 1903 – 2004.	29
Abbildung 3-5: Übersicht über die Hauptpunkte der kinematischen Ausgleichung (CHVRF04/LHN95). Grosser Stern: Zimmerwald Z0; kleine Sterne: wiederholt beobachtet; weisse Kreise: nur eine Beobachtung.	29
Abbildung 3-6: Die relativen Standardabweichungen der geopotentiellen Knoten gegenüber dem Referenzpunkt Zimmerwald [mgpu].	30
Abbildung 3-7: Die relativen Standardabweichungen der Potentialänderungen gegenüber dem Referenzpunkt Aarburg [mgpu·a ⁻¹].	30
Abbildung 3-8: Rezente vertikale Krustenbewegungen entlang den Linien des Landeshöhennetzes (Stand Ende 2004). Rote Balken: positive Höhenänderungen; grüne Balken: negative Höhenänderungen gegenüber Aarburg [mm·a ⁻¹].	31
Abbildung 3-9: Das Modell CHKLM95 der Vertikalbewegungen der Schweiz [mm·a ⁻¹].	31
Abbildung 3-10: Fehleranteil der mittleren Schwere an den orthometrischen Höhen [mm].	32
Abbildung 3-11: Die Differenzen zwischen den orthometrischen Höhen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02.	33
Abbildung 3-12: Unterschied zwischen den orthometrischen Höhen und den Normalhöhen LHN95: rechts Höhen [m] gegenüber Differenzen [mm].	33
Abbildung 3-13: Unterschied zwischen den Normalhöhen LHN95 und den Gebrauchshöhen LN02: rechts Höhen [m] gegenüber Differenzen [mm].	34
Abbildung 3-14: Differenzen zwischen den offiziellen Höhen der Schweiz und den Nachbarländern (Vorzeichen: CH-Nachbarland) in [cm].	35
Abbildung 3-15: Differenzen zwischen Schweizer Normalhöhen (aus LHN95) und den offiziellen Höhen der Nachbarländer (Vorzeichen: CH-Nachbarland) in [cm].	36
Abbildung 5-1: Netze UELN-55 und UELN-73.	40
Abbildung 5-2: Die Messungen (schwarze Linien) zum Schweizer Beitrag zu UELN-73/86 und UELN-95/98.	40
Abbildung 5-3: Erweiterter und aktualisierter Datensatz 2002 der Schweiz (mit den alten UELN-Knotenpunkten). Beitrag für EVRF2007.	42



Abbildung 5-4: Übersicht der Datensätze für EVRF2000 und EVRF2007 (Sacher et al., 2008).....	42
Abbildung 5-5: Differenzen zwischen EVRF2000 und EVRF2007 in mm (Sacher et al., 2008).....	43
Abbildung 5-6: Differenzen EVRF2019 – EVRF2007 (Sacher & Liebsch, 2019).....	44
Abbildung 5-7: Mittlere Offsets der nationalen Höhensysteme gegenüber EVRF2019.....	44
Abbildung 5-8: UELN-73/95-Verbindungen mit dem Schweizer Beitrag zu den EUVN-Punkten (grosse Sterne) sowie zu EUVN-DA (kleine Sterne).....	45
Abbildung 5-9: EUVN-DA-Punkte und Vergleich mit dem Europäischen Quasigeoid EGG2008.....	46
Abbildung 5-10: Das europäische Geoidmodell EGG2015 (Isolinienabstand 5 m).	47
Abbildung 5-11: Quasigeoid EGG2015 im Alpenraum.....	47
Abbildung 6-1: Unterschiede zwischen der Oberfläche der Höhen $H=0$ in NAVD88 und einem gravimetrischen Geoid.	50
Abbildung 6-2: Abnahme der Höhen mit dem Anstieg des globalen Meeresspiegels (<i>Global mean sea level GMSL</i>).	52
Abbildung 6-3: Datenquellen, die zur Erstellung des globalen Modells GM2022 dienen.	53
Abbildung 6-4: Datenquellen, die zur Erstellung hochauflösender Raster dienen.....	53
Abbildung 6-5: Bestimmung von geometrischen Koordinaten im neuen Datum.....	54
Abbildung 6-6: Bestimmung von geopotentiellen Koordinaten im neuen Datum.....	55
Abbildung 6-7: Bestimmung von orthometrischen Höhen im neuen Datum.	55
Abbildung 6-8: Der Baltische Nivellementring BLR2000. Der Kreis zeigt den Fundamentalpunkt in Amsterdam.....	57
Abbildung 6-9: links: Norwegisches Netz erster Ordnung. Rot = 1 Messung, blau = 2 zwei Messungen, grün = 3 Messungen. Rechts: Eisenbahnnivellementnetz (rot) und Netz zweiter Ordnung (grün).....	58
Abbildung 6-10: Prozess der Höhen-Dissemination.	59
Abbildung 6-11: Höhenunterschiede zwischen LN1954 und LN2000.....	60
Abbildung 6-12: AdV-Plenumsbeschluss zur Einführung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs (AdV, 2018).....	62
Abbildung 6-13: Netzentwurf deutsches Haupthöhennetz DHHN2016 (AdV, 2018).....	63
Abbildung 6-14: Quasigeoidmodell GCG2016.	65
Abbildung 6-15: Höhenunterschiede DHHN2016 minus DHHN92, Realisierung 2016 (Eingangsdaten für die Berechnung des Transformationsmodells HOETRA2016).....	66
Abbildung 6-16: Differenzen NIREF – IGN69 (Stand 2015), inkl. neu gemessene Linien 1. Ordnung 1992 – 1999 im Norden.....	68
Abbildung 6-17: Das österreichische Nivellementnetz.....	70
Abbildung 6-18: Differenzen Gebrauchshöhen (Adria) minus orthometrische Höhen (Amsterdam).....	71
Abbildung 6-19: Hauptlinien des GE42 und Plan der Neumessungen.	73
Abbildung 6-20: Lokale Höhensysteme (LVD) vor 2009 und Nivellementnetz.....	75
Abbildung 6-21: Aerogravimetrie Neuseeland 2013–2014.	77
Abbildung 6-22: Vertikalverschiebungen nach dem kinematischen Modell NKG2005LU, in mm/Jahr (links) und Netz des dritten Präzisionsnivellements, 1979 - 2003 (rechts). Quelle: Svensson et al. (2006).	78



Tabellenliste

Tabelle 2-1 : Gezeitensysteme.....	15
Tabelle 2-2: Praktische Anwendungsfälle von Höhenangaben sowie erforderliche Produkte.....	21
Tabelle 3-1 : Teilprojekte und ursprüngliche Etappierung des Projekts LHN95 im Jahre 1999 (<i>Schlatter & Marti, 2007</i>).	27
Tabelle 6-1: Eigenschaften des Nordamerikanischen und Pazifischen Geopotentialdatums 2022.....	51
Tabelle 6-2: Überblick über die Höhenreferenzrahmen in Deutschland (AdV, 2018).....	61
Tabelle 6-3: Systemfestlegungen (AdV, 2018).	63
Tabelle 6-4: durchgeführte Messungen im deutschen Haupthöhennetz DHHN2016 verteilt auf die einzelnen Bundesländer.....	64





Abkürzungen

A10	Absolutgravimeter Micro-g LaCoste A10
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik (Deutschland)
AGNES	Automatisches GNSS Netz der Schweiz
AIG	Amt für Geoinformation AGI des Kanton Bern
ASVD02	American Samoa Vertical Datum of 2002
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Österreich)
BGI	Bureau gravimétrique international
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Deutschland)
BLR2000	Baltic Levelling Ring of 2000
CdH	Catalogue des hauteurs
CERCO	Comité européen des responsables de la cartographie officielle
CH1903+	Lokales Geodätisches Referenzsystem der Schweiz
CHGeo2004	Schweizer Geoidmodell 2004
CHKLM95	Swiss Kinematic Levelling Modell of 1995
CHTRF2004	Swiss Terrestrial Reference Frame of 2004
CHVRF04	Swiss Vertical Reference Frame of 2004
CNIG	Conseil national de l'information géographique (Frankreich)
DDEFLEC2022	Dynamic Deflection of the Vertical model of 2022 (USA)
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DEFLEC2022	Regional gridded deflection of the vertical models of 2022 (USA)
DGEID2022	Dynamic Geoid model of 2022 (USA)
DGM2022	Dynamic Geopotential Model of 2022 (USA)
DHHN12	Deutsches Haupthöhennetz 1912
DHHN2016	Deutsches Haupthöhennetz 2016
DHHN85	Deutsches Haupthöhennetz 1985
DHHN92	Deutsches Haupthöhennetz 1992
DHSN2016	Deutsches Hauptschwerenetz 2016
EGG1996	European Gravimetric Geoid of 1996
EGG1997	European Gravimetric Geoid of 1997
EGG2007	European Gravimetric Geoid of 2007
EGG2008	European Gravimetric Geoid of 2008
EGG2015	European Gravimetric Geoid of 2015
EGM2008	Earth Gravitational Model of 2008 (Modèle gravitationnel terrestre de 2008)
EGM96	Earth Gravitational Model of 1996 (Modèle gravitationnel terrestre de 1996)
EPNN	Einheitliches Präzisionsnivellementsnetz, auch Uniform Precise Levelling Network of Central and Eastern Europe (UPLN)
ERNIT	Entretien du réseau de nivellement par les triplets (Unterhalt des Nivellement-netzes durch Dreiergruppen, Frankreich)
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Ecole polytechnique fédérale de Zürich)
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
ETRF2007	European Terrestrial Reference Frame of 2007
ETRF2019	European Terrestrial Reference Frame of 2019



ETRS89	European Terrestrial Reference System of 1989
EUREF	IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe (Subkommission der IAG für europäische Referenzrahmen)
EUVN	European Vertical Reference Network
EUVN-DA	European Vertical Reference Network Densification Action
EVRF	European Vertical Reference Frame
EVRF2000	European Vertical Reference Frame of 2000
EVRF2007	European Vertical Reference Frame of 2007
EVRF2019	European Vertical Reference Frame of 2019
EVRS	European Vertical Reference System
EVRS2000	European Vertical Reference System of 2000
FFT	Fast Fourier Transformation
FG5	Absolutgravimeter Micro-g LaCoste FG5
GBVP	Geodetic Boundary Value Problem
GCG	German Combined QuasiGeoid
GCG2016	German Combined QuasiGeoid of 2016
GE42	Genova 1942 (Italien)
GEOID2022	Regional gridded geoid undulation models of 2022
GEOonAUT	Österreichisches Geoid 2008
GGM	Globales Geoidmodell (Deutschland)
GGN	Geodätischen Grundnetzpunkte (Deutschland)
GISGEO2012	Geoidmodell für die Grenzregion Italien – Schweiz 2012
GLONASS	Global Navigation Satellite Systems (Russland)
GM	Gravitationsparameter der Erde
GM2022	Geopotential Model of 2022 (USA)
GMSL	Global Mean Sea Level
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System (USA)
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRAV2022	Regional gridded surface gravity models of 2022 (USA)
GRAV-D	Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum (USA)
GRS80	Geodetic Reference System of 1980
GUVD04	Guam Vertical Datum of 2004 (USA)
H.ü.A	Höhen über Adria (Österreich)
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
HELIDEM	Helvetia Italy Digital Elevation Model
HFP	Höhenfixpunkt
HOETRA2016	Höhentransformation 2016 (Deutschland)
HREF	Height Reference Surface
HTRANS	Höhentransformation zwischen LN02 et LHN95
IAG	International Association of Geodesy
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IfE	Institut für Ermessung, Leibniz Universität Hannover
IGM	Istituto Geografico Militare (Italien)
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière (Frankreich)
IGS	International GNSS Service



IGSxx	Geodätisches Datum des IGS
IHRF	International Height Reference Frame
IHRs	International Height Reference System
ItalGeo1999	Italian Quasi-Geoid of 1999
ItalGeo2000	Italian Quasi-Geoid of 2000
ItalGeo2005	Italian Quasi-Geoid of 2005
ItalGeo2020	Italian Quasi-Geoid of 2020
ItalGeo95	Italian Quasi-Geoid of 1995
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
LCR	LaCoste-Romberg
LHN95	Landesöhennetz 1995
LHN95-DB	Datenbank des Landesöhennetz 1995
LHN95-KIN	Kinematische Ausgleichung LHN95
LHN95-LIN	Erfassung der Linienmessungen und LV95-Anschlussmessungen
LHN95-NF	Erfassung der Nachführungsmessungen
LHN95-TrF	Transformation / Übergang zwischen den Höhensystemen
LHN95-V	Pilotprojekt zur Verdichtungsmessung mit GPS
LN02	Landesnivellementnetz 1902
LVD	Local Vertical Datum (Neuseeland)
MGI	Militärgeografisches Institut (Österreich)
MN03	Mensuration nationale 1903 (Schweiz)
MN95	Mensuration nationale 1995 (Schweiz)
DHM25	Digitales Höhenmodell 1:25'000
N2000	Finnisches Höhenbezugssystem 2000
NAP	Normaal Amsterdams Peil
NAPGD2022	North American-Pacific Geopotential Datum of 2022 (USA)
NAVD88	North American Vertical Datum of 1988 (Datum vertical nord américain de 1988, USA)
NdP	Nivellement de précision (Schweiz)
NF	Nivellement fédéral (Schweiz)
NF02	Réseau du nivellement fédéral 1902 (Schweiz)
NGDI	Nationale Geodaten-Infrastruktur
NGF-Bourdalouë	Nivellement général de la France - Réseau Bourdalouë
NGF-IGN69	Nivellement général de la France - Institut national de l'information géographique et forestière de 1969
NGF-Lallemant	Nivellement général de la France - Réseau Lallemant
NGS	National Geodetic Survey (USA)
NHN	Höhen über Normalhöhennull (Deutschland)
NHP	Nullpunkt Hoppegarten (Deutschland)
NIGEMO	Nivellement géométrique motorisé (Frankreich)
NIREF	Nivellement de Référence (Frankreich)
NIREF 2015	Nivellement de référence de 2015 (Frankreich)
NITRIMO	Nivellement trigonométrique motorisé (Frankreich)
NIVAG	Nivellement assisté par GPS (Frankreich)



NKG 2004	Schwedisches Quasigeoidmodell 2004
NKG2005LU	Nordic Geodetic Commission Land Uplift of 2005
NKG2016LU	Nordic Geodetic Commission Land Uplift model of 2016
NMVD03	North Marianas Vertical Datum of 2003 (USA)
NN	Normalnull (Deutschland)
NN1954	Norway Normal Null 1954
NN2000	Norway Normal Null 2000
NR	Nivellement de repérage (Schweiz)
NZGeoid2009	New Zealand Quasigeoid of 2009
NZGeoid2016	New Zealand Quasigeoid of 2016
NZVD2009	New Zealand Vertical Datum of 2009
NZVD2016	New Zealand Vertical Datum of 2016
PGV	Point GPS village (France)
POLIMI	Politecnico di Milano (Italien)
PPP	Precise Point Positioning
PRVD02	Puerto Rico Vertical Datum of 2002 (USA)
QGF2016	Modèle de quasi-géoïde français de 2016
QGF98	Modèle de quasi-géoïde français de 1998
RAF	Références des altitudes françaises
RAF09	Grille de conversion de 2009 (France)
RAF2018	Grille de conversion de 2018 (France)
RAF2018b	Grille de conversion de 2018b (France)
RAF98	Grille de conversion de 1998 (France)
RAN	Réseau altimétrique national (Suisse)
RAN95	Réseau altimétrique national de 1995 (Suisse)
RBF	Réseau de base français
REUN	Réseau européen unifié de nivellement, auch UELN
RGF93	Réseau géodésique français de 1993
RGP	Réseau GNSS permanent (France)
RH70	Rikets Höjdsystem 1979 (Schweden)
RH2000	Rikets Höjdsystem 2000 (Schweden)
RMS	Root Mean Square
RPN	Repère de la Pierre du Niton
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst (Deutschland)
SDEFLEC2022	Static Deflection of the Vertical model of 2022 (USA)
SGEIOD2022	Static Geoid model of 2022 (USA)
SGK	Schweizerische Geodätische Kommission
SGM2022	Static Geopotential Model of 2022 (Modèle géopotentiel statique de 2022, USA)
SGRAV2022	Static Gravity model of 2022 (Grilles régionales de la pesanteur à la surface statique de 2022, USA)
SI	Système international d'unités
SNN56	Staatliches Nivellementnetz von 1956 (Deutschland)
SNN76	Staatliches Nivellementnetz von 1976 (Deutschland)
SUPSI	Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana



SWEN 05LR	Swedish quasigeoid model of 2005
SWREF99	Swedish Reference Frame of 1999
TBD	To Be Defined
TRFs	Terrestrial Reference Frames
TU	Technische Universität
TWG	Technical Working Group
UELN	United European Levelling Network
UELN-2000	United European Levelling Network of 2000
UELN-55	United European Levelling Network of 1955
UELN-73	United European Levelling Network of 1973
UELN-73/86	United European Levelling Network of 1973-1986
UELN-95	United European Levelling Network of 1995
UELN-95/98	United European Levelling Network of 1995-1998
UPLN	Uniform Precise Levelling Network of Central and Eastern Europe
VERTCON	Vertical Conversion (USA)
VI-GBT	Vermessung Gotthard-Basistunnel
VIVD09	Virgin Islands Vertical Datum of 2009 (USA)
VN	Versicherungsnivellement
WGS84	World Geodetic System 1984