

---

REZENTE HÖHENÄNDERUNGEN IN ÖSTERREICH  
ABGELEITET AUS PRÄZISIONSNIVELLEMENT-MESSUNGEN

N.Höggerl

BEV Wien

---

EINLEITUNG

Seit 1873 werden in Österreich Präzisionsnivellements von staatlichen Institutionen zur Schaffung eines einheitlichen überregionalen Bezugshorizontes durchgeführt. Diese Messungen wurden immer nach dem jeweils letzten Stand der Technik ausgeführt und lieferten somit eine ausgezeichnete Grundlage regionale Höhenmessungen in einem einheitlichen System zu vereinen. Darüber hinaus liegt es auch nahe, die Ergebnisse von Präzisionsnivellements, die zwischen identen Höhenpunkten durchgeführt wurden, zu vergleichen und daraus auf Höhenänderungen zwischen den betroffenen Punktvermarkungen zu schließen. Um jedoch tatsächliche Höhenänderungen von scheinbaren zu trennen, die durch die Fehler der Meßmethode hervorgerufen sind, ist eine genaue Kenntnis der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messungen erforderlich.

Da die Meßmethode des Präzisionsnivellements direkt mit dem Erdschwerefeld verknüpft ist, sind auch Änderungen des Erdschwerefeldes zu berücksichtigen. Da jedoch einerseits entlang der meisten untersuchten Nivellementlinien nur einfache Schweremessungen vorliegen, andererseits aber für jene Punkte oder Bereiche, an denen Mehrfachmessungen durchgeführt wurden, keine signifikanten Schwereänderungen ( $\Delta g < 50 \mu\text{gal}$ ) festgestellt werden konnten, werden für die weiteren Untersuchungen anstelle von Potentialdifferenzen Höhenunterschiede verwendet.

## DATENMATERIAL

Seit 1948 wurden für die Schaffung eines übergeordneten Höhen-netzes und weiters für dessen Kontrolle zwei Messungen durchge-führt. Die erste Meßepoche umfaßte den Zeitraum von 1948 bis 1962, wobei ca. 7000 km Nivellementlinien 1. Ordnung gemessen wurden. Aus den dabei entstandenen 57 Schleifen errechnete sich ein mittlerer Schleifenschlußfehler von

$$m_1^S = \pm 1,6 \text{ mm/km.}$$

Ab 1966 wurde mit der Übermessung des o.a. Netzes begonnen, wobei bis 1987 ca. 5500 km Nivellementlinien gemessen wurden. Die Gegenüberstellung der Fehlergrößen aus Schleifenschlüssen mit

$$m_2^S = \pm 0,4 \text{ mm/km}$$

und jenen aus einer Ausgleichung (Höggerl, 1986) mit

$$m_2^A = \pm 0,6 \text{ mm/km}$$

zeigt eine gute Übereinstimmung und gleichzeitig eine wesentliche Genauigkeitssteigerung gegenüber der 1. Meßperiode. Um jedoch für beide Meßepochen ein möglichst identes Netz für den Vergleich von Höhendifferenzen zu erhalten, ist es erforderlich noch Messungen des Reichshöhennetzes aus den Jahren 1939 - 1941 in einem Umfang von ca. 500 km und mit einer Genauigkeit von

$$m_1 = \pm 0,5 \text{ mm/km}$$

einzu beziehen.

Für die Bildung einer netzförmigen Struktur in den westlichen Teilen Österreichs wurden auch noch bayerische und Schweizer Linien verwendet, deren Genauigkeit etwa jenen der österreichischen Messungen entspricht (verwendete Linienlänge 770 km). Für die bayerischen Linien standen dieselben Ausgangswerte wie für die österreichischen Linien zur Verfügung (Weber, 1986). Für die Schweizer Linien konnte bereits auf Vertikalgeschwindigkeiten der Knotenpunkte zurückgegriffen werden (Gubler, 1980). Die Untersuchungen erstreckten sich auf 2 Netze mit identer Linienführung und einer Länge von 5500 km mit 32 Schleifen. Die zeitliche Verteilung aller verwendeten Messungen zeigt Abb.1.

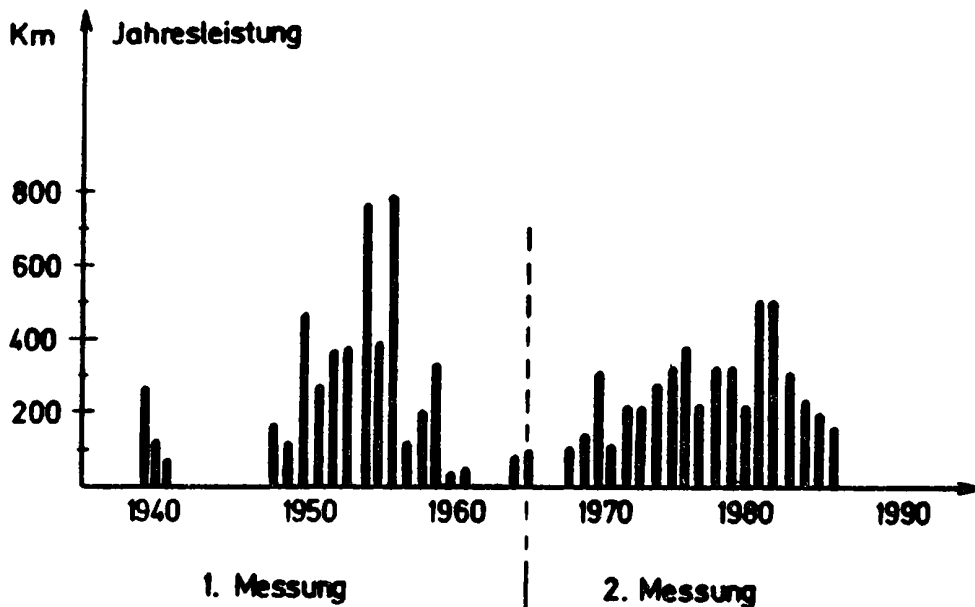


Abb.1: Zeitliche Verteilung der Nivellementmessungen

#### BEZUGSPUNKTE

In dieser Arbeit werden, abgesehen von einigen Ausnahmen, nur die Knotenpunkte des Netzes für Untersuchungen und Aussagen über rezente Höhenänderungen verwendet. Aufgrund der topografischen Beschaffenheit Österreichs liegen viele dieser Punkte in alpinen Talregionen an Schnittstellen von Störzonen. In diesen Bereichen

wurde nicht der geometrisch bestgelegene, sondern der aus lokalen Linienvergleichen stabilste Höhenpunkt in die weiterführende Ausgleichung mit einbezogen. Daß dabei keine Vermarkungen im Fels vorkommen, liegt einerseits, wie erwähnt, an der Lage der Knotenpunkte und andererseits an der Tatsache, daß bei den Messungen aus der 1. Epoche (1939 - 1962) nur ein ganz geringer Anteil von Felsvermarkungen ( $< 1\%$ ) verwendet wurde. Wie statistische Untersuchungen gezeigt haben, (Lang, 1970) sind jedoch auch Vermarkungen in sorgfältig ausgewählten künstlichen Objekten (alte Kirchen, große Häuser u.a.) genauso geeignet regionale Höhenänderungen aufzuzeigen, wie das Vermarkungen im Felsen ermöglichen.

Die Verteilung der Knotenpunktobjekte auf einzelne Qualitätsklassen ist in Abb.2 enthalten. Es ist ersichtlich, daß es in 95% der Fälle möglich war, Objekte mit einer sehr guten bis ausreichenden Qualität für die Untersuchung zu finden.

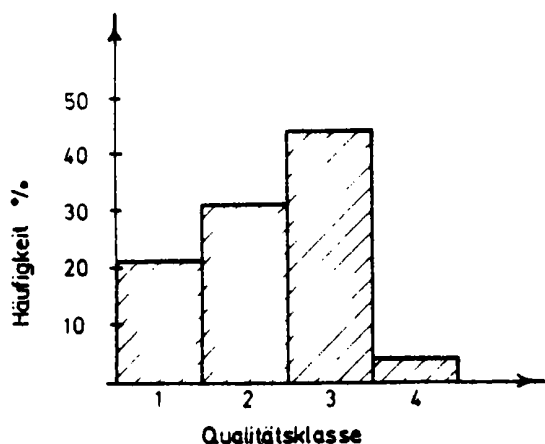


Abb.2: Qualitätsklassen der Punktvermarkungen

- 1... Kirche (alt)
- 2... Gebäude (groß)
- 3... Gebäude (klein)
- 4... sonstiges (Brücke, etc.)

Durch die Einschränkung der Untersuchung auf die Knotenpunkte des Netzes ergeben sich wesentlich geringere Höhendifferenzen als für das Gesamtnetz. Eventuell vorhandene Maßstabsdefekte zwischen den einzelnen Meßepochen treten dadurch weniger stark in Erscheinung. Die Verteilung der Knotenpunktshöhen ist in Abb.3 dargestellt. Es zeigt sich, daß 90% der Höhendifferenzen unter 300 m liegen; die durchschnittliche Höhe der Knotenpunkte liegt bei 500 m.

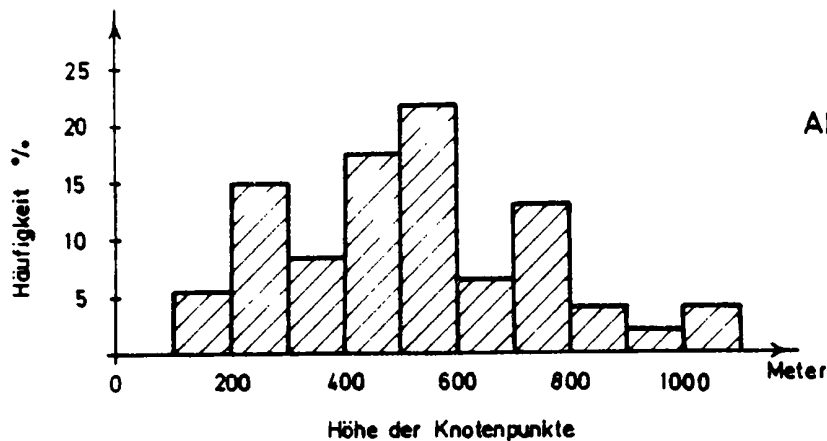


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Knotenpunktshöhen

### BERECHNUNGSMODELL

Um die über einen Zeitraum von fast 40 Jahren verteilten Messungen in einer gemeinsamen Berechnung verwenden zu können, ist es erforderlich, die Höhenänderungen auf ein einheitliches Zeitintervall zu beziehen. Um der Größe der dabei auftretenden Höhenänderungen Rechnung zu tragen, ist es allgemein üblich die Ergebnisse in Punktgeschwindigkeiten (mm/Jahr) anzugeben. Für die Berechnung wurde das von Holdahl entwickelte Modell 2 (Holdahl, 1975) verwendet, da es sich für die Struktur der vorhandenen Daten am besten eignet:

- zweifache Messung eines nahezu identen Netzes,
- Aufteilung der Messungen auf zwei voneinander getrennte Meßepochen,
- Verwendung von Höhenunterschieden (möglich, da im untersuchten Gebiet keine signifikanten Schwereänderungen aufgetreten sind)
- linearer Ansatz der Höhenänderung (geeignet für die Verwendung von nur zwei Meßepochen).

Die Geschwindigkeitsdifferenzen  $\Delta v$  zwischen den Knotenpunkten werden als "Beobachtungen" verwendet:

$$v_{ij} = \frac{\Delta h^1_{ij} - \Delta h^2_{ij}}{\Delta t} \quad (1)$$

$\Delta h^1_{ij}, \Delta h^2_{ij}$  ....Höhendifferenz zwischen den Knoten i und j für die 1. und 2. Meßepoche

$\Delta t$  ....Zeitdifferenz zwischen der 1. und 2. Messung einer Linie.

Für die Festlegung der Gewichte wurde der vereinfachte, für Nivellementmessungen übliche Ansatz

$$p = \frac{1}{L} \quad (2)$$

mit L als der Länge des Meßweges, gewählt. Als Unbekannte in der Ausgleichung werden die Geschwindigkeiten der einzelnen Knotenpunkte angesetzt. Das dadurch entstehende Ausgleichungsproblem ist ident mit der Ausgleichung eines Höhennetzes, nur daß anstelle der unbekanntenen Höhen die Vertikalgeschwindigkeiten und anstelle der Höhenunterschiede die Geschwindigkeitsdifferenzen treten. Die Ausgleichung erfolgte mit dem Gauß-Markov Modell zwangsfrei unter Verwendung eines Datumspunktes:

$$A'PAv - A'P\Delta v = 0 \quad (3)$$

mit der Designmatrix A, der Gewichtsmatrix P, dem Vektor v der ausgeglichenen Vertikalgeschwindigkeiten und dem Vektor  $\Delta v$  der Beobachtungen.

Um eine von einem Datumspunkt unabhängige Genauigkeitsaussage zu erhalten, wurde auch eine freie Ausgleichung mit einer Zusatzbedingung durchgeführt.

## ERGEBNISSE

Die Ergebnisse beziehen sich auf den in die Ausgleichung eingeführten Datumspunkt und lassen sich durch eine eindimensionale Transformation prinzipiell auf jeden beliebigen Netzpunkt umrechnen. Das Böhmisches Massiv, welches als die stabilste geologische Formation Österreichs angesehen wird, bietet die besten Voraussetzungen für die Lage eines entsprechenden Datumspunktes. Es wurde die Stadtpfarrkirche in Freistadt als Referenzpunkt gewählt, da dieser Ort sehr zentral innerhalb des Böhmisches Massivs liegt und die tertiäre Aufschüttung in diesem Bereich sehr gering ist.

In Abb.4 sind die Ergebnisse für die Knotenpunkte des Netzes und einige wichtige Zwischenpunkte dargestellt. Die voll ausgefüllten Balken geben die Vertikalgeschwindigkeit an, die leeren Balken den auf den Datumspunkt bezogenen mittleren Fehler der Vertikalgeschwindigkeiten. Diese Karte zeigt Hebungen für den zentralen Teil des Alpenbereiches mit durchschnittlichen Werten von +1 mm/Jahr und maximalen Werten von +2,1 mm/Jahr in Mauterndorf (Salzburg). Geringfügige Hebungen treten im östlichen Alpenbereich sowie am südlichen und östlichen Rand des Böhmisches Massivs auf. Wie zu erwarten sind die östlichen und südlichen Beckenlandschaften Österreichs durch Senkungen vertreten, die im Bereich des Wiener Beckens Maximalwerte bis zu -1 mm/Jahr (Wr. Neustadt) erreichen. Für die übrigen Bereiche, wie die Molassezone, das westliche Böhmisches Massiv sowie der östliche Alpenrand, ergeben sich entweder geringfügige Hebungen oder Senkungen.





## GENAUIGKEIT UND ZUVERLÄSSIGKEIT DER ERGEBNISSE

Für die Berechnungen mit dem Datumspunkt in Freistadt ergibt sich eine Standardabweichung für die Vertikalgeschwindigkeiten von

$$m_0 = \pm 0,77 \text{ mm/Jahr}$$

und für den Ausgleich ohne Datumspunkt eine Standardabweichung von

$$m_0 = \pm 0,58 \text{ mm/Jahr.}$$

Es zeigt sich, daß nur im Bereich der Hohen Tauern (Mauterndorf, Lend, Mittersill) die Vertikalgeschwindigkeiten die doppelte mittlere Standardabweichung übersteigen und damit als signifikant angesehen werden können. Für den westlichen Netzteil liegen die Ergebnisse zwischen der einfachen und zweifachen Standardabweichung und sind daher als Trend zu betrachten. Alle übrigen Änderungen sind eher als zufällige Werte zu betrachten. Unter Verwendung der standartisierten Verbesserungen wurde ein von Pope entwickelter Ausreißertest (Pope, 1976) sowie ein Anpassungstest zur Untersuchung auf Normalverteilung durchgeführt. Der Pope-Test zeigt für eine Verbesserung einen an der Grenze zum Ausreißer liegenden Wert für den Bereich Lofer-Kufstein an, der jedoch aufgrund der schwachen Netzkonfiguration in diesem Bereich nicht entfernt wurde. Die Ergebnisse des Anpassungstests, der für eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99% erfüllt wurde, sind in Abb.5 dargestellt.

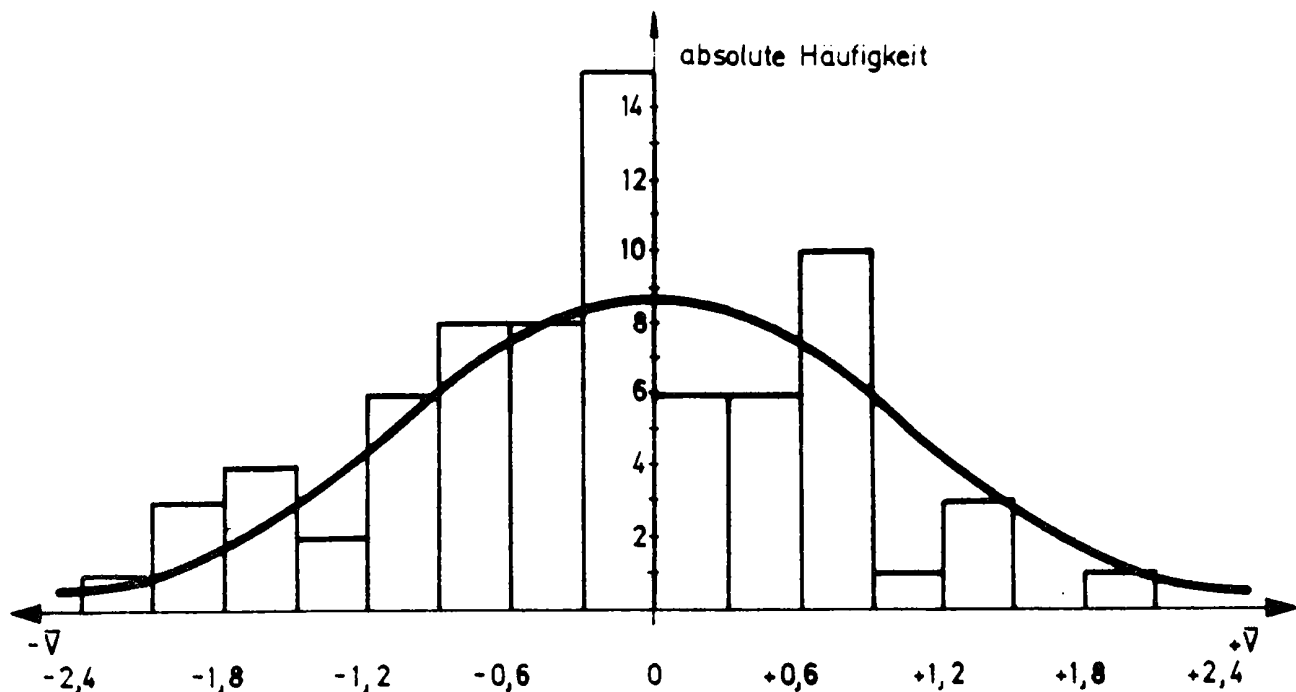


Abb.5: Histogramm der standartisierten Verbesserungen

Ein Vergleich kann auch mit früheren Berechnungen (Högerl, 1980) von vertikalen Krustenbewegungen durchgeführt werden. Bei diesen Berechnungen wurde im zentralen und östlichen Teil Österreichs ein Teilnetz des jetzt untersuchten Netzes verwendet. Im Gegensatz zu den früher untersuchten Messungen ist für das neue Netz durch zusätzliche Linien eine wesentliche Verstärkung der Netzstruktur, sowie in den nördlichen und östlichen Bereichen auch eine Erweiterung eingetreten. In Abb.6 sind die Vertikalgeschwindigkeiten aus dem Jahr 1987 denen aus 1980 in Form von Differenzen  $v_{1987}$  minus  $v_{1980}$  dargestellt. Es ergeben sich zwei Extremwerte von + 0,8 mm/Jahr für Wien und - 0,9 mm/Jahr für Klagenfurt. Diese beiden Differenzen liegen nur knapp über der Standardabweichung von  $\pm 0,77$  mm/Jahr für das neue Netz und liegen jeweils am Rand des Netzes.

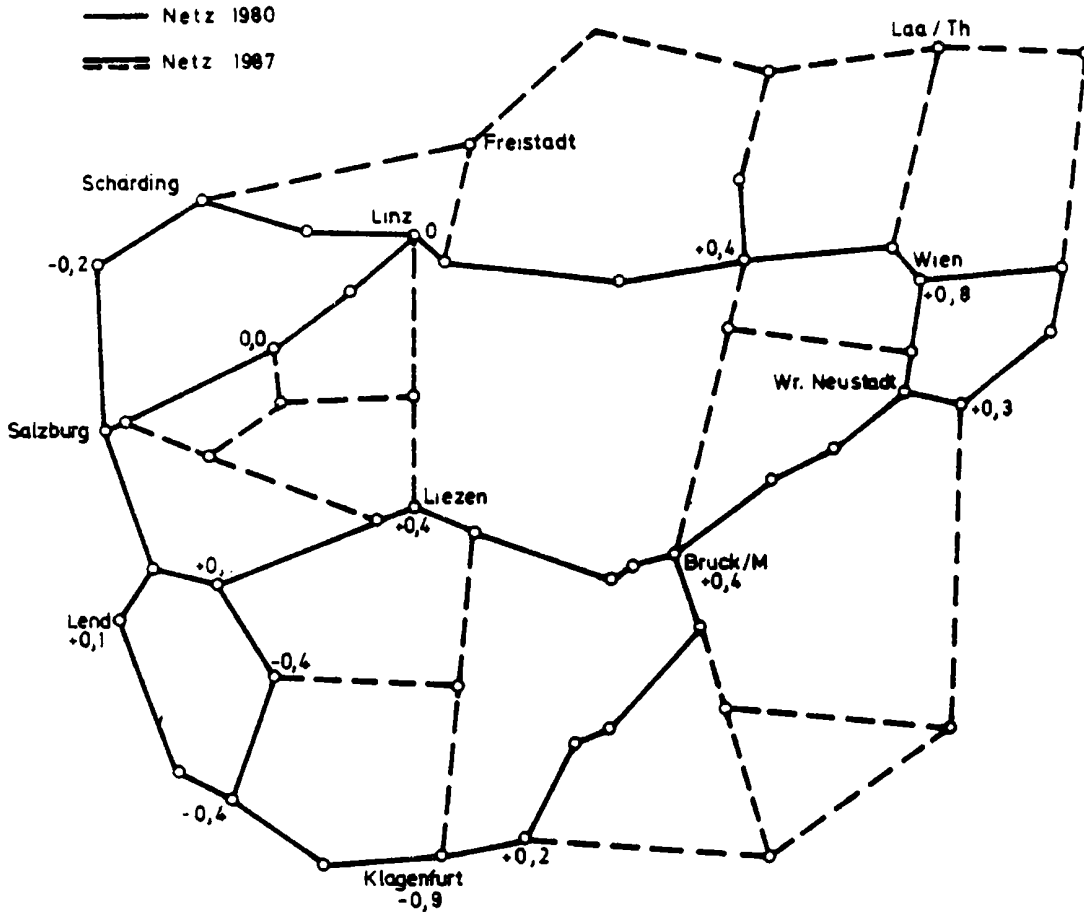


Abb.6: Differenzen der Vertikalgeschwindigkeiten in mm/Jahr

Ein Vergleich mit ähnlichen Untersuchungen benachbarter Länder zeigt jedoch gute Übereinstimmung in den Ergebnissen: Hebungen des Alpenbereiches von 1-2 mm/Jahr in Bezug auf das Böhmisches Massiv in Bayern (Weber, 1986) und ebensolche Hebungen in der Schweiz für die Alpen mit Bezug auf den Jura (Gubler, 1980).

#### AUSBLICK

Wünschenswert wäre die Einbeziehung aller zweifach gemessenen geologisch sicheren Punktvermarkungen, die zwischen den Knotenpunkten liegen. Dadurch wäre eine detaillierte Aussage auch für regionale Bereiche möglich. Bei Berücksichtigung dieser

Zwischenpunkte treten jedoch wesentlich größere Höhendifferenzen auf (bis zu 1800 m im gesamten Netz) als bei den bisherigen Untersuchungen. Ein Teil der dabei möglichen Fehler wird durch Differenzbildung eliminiert (Refraktion); für die maßstabsbedingten Einflüsse ist jedoch eine genaue Kenntnis eventueller Änderungen des Lattenmeters erforderlich. Auch ein Vergleich der Messungen aus 1948-1987 mit jenen aus 1873-1895 könnte, trotz geringerer Genauigkeit der älteren Messungen, aufgrund der großen Zeitdifferenz interessante Aufschlüsse über Höhenänderungen bringen. Eine gemeinsame Bearbeitung aller vorhandenen Messungen im alpinen Bereich könnte zu einer Verstärkung der Einzelnetze führen, wovon besonders der westliche Teil des österreichischen Netzes profitieren würde.

Die Durchführung weiterer Nivellementmessungen wird nur mehr für einzelne Linien möglich sein. Eine gesamte Übermessung des übergeordneten Höhennetzes wird aufgrund der hohen Kosten des Präzisionsnivellements, sowie neuer Meßtechnologien (Global Positioning System - GPS) höchstwahrscheinlich nicht mehr zustande kommen. Der Einsatz von GPS-Messungen für die Bestimmung von Lageänderungen (inklusive Höhenänderungen) beinhaltet jedoch noch viele ungeklärte Fragen, wie Stabilität des Referenzsystems, Refraktionseinflüsse, Verbindungsmessungen zwischen den Standpunkten des terrestrischen Netzes und dem GPS-Netz, sodaß durch GPS-Messungen kurzfristig keine wesentlichen Beiträge in Hinblick auf Größe und Lage der Vektoren von rezenten Lageänderungen der Erdoberfläche zu erwarten sind.

LITERATUR

- Gubler, E. (1980): Vertical Movements in Switzerland. Rock Mechanics Suppl. 9, Springer-Verlag 1980.
- Gubler, E. (1983): Persönliche Kommunikation.
- Höggerl, N. (1980): Repeated Levelling and Vertical Crustal Movements. Rock Mechanics Suppl. 9, Springer Verlag 1980.
- Höggerl, N. (1986): Die Ausgleichung des österreichischen Präzisionsnivellements. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft 4, 1986.
- Holdahl, S. (1975): Models and Strategies for Computing Vertical Crustal Movements in the United States. Preprint for the International Symposium on Recent Crustal Movements, Grenoble, France 1975.
- Lang, M. (1970): Lokale Beständigkeit der Höhe eines Präzisionsnivellementpunktes aus regionalen statistischen Untersuchungen. Vierte Fachtagung für Vermessungswesen in Wien, 1970.
- Pope, A. (1976): The Statistic of Residuals and the Detection of Outliers. NOAA Technical Report NOS 65 NGS 1, Rockville 1976.
- Weber, D. (1986): Persönliche Kommunikation, Oktober 1986.