

Diss. Nr. 4438

**Zur Genauigkeit
geodätischer Verschiebungsmessungen**

ABHANDLUNG
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der technischen Wissenschaften

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

HEINZ AESCHLIMANN
dipl. Verm.-Ing. ETH

geboren am 30. 9. 1931
von Langnau i. E. (Kanton Bern)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. F. Kobold, Referent
Prof. G. Schnitter, Korreferent

Zusammenfassung

Trotz der ausgedehnten Anwendung geodätischer Verschiebungsmessungen in der Ingenieurpraxis ist die Untersuchung der Genauigkeit der Verschiebungen vielfach unterblieben oder doch nur mit vielen Vernachlässigungen durchgeführt worden. Für die Beobachtung von Staumauern hat sich ein aus Triangulation und Präzisionspolygonzug kombiniertes Bestimmungsverfahren als zweckmässig erwiesen und für grössere Anlagen allgemein durchgesetzt.

Die Genauigkeit einer Verschiebung wird durch Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Sie ist gegeben durch ihren Gewichtskoeffizienten und den zugehörigen mittleren Fehler der gewählten Gewichtseinheit. In der vorliegenden Arbeit werden in einem Hauptabschnitt die Gewichtskoeffizienten der in einem geodätischen Netz bestimmten Verschiebungen berechnet und die Auswirkungen von Unbekannten, die in allen Beobachtungsepochen gleich sind, untersucht. In einem zweiten Hauptabschnitt gilt das Interesse der Invardrahtmessung von Polygonseiten, insbesondere dem allgemein angewandten Eichverfahren der Drähte und den in der Praxis erreichten Genauigkeiten von unbekanntem Strecken. In einem weiteren Hauptabschnitt werden einige geodätische Netze fehlertheoretisch unter Berücksichtigung der gewonnenen Ergebnisse untersucht. Ein bestehendes Netz wird besonders eingehend diskutiert, da hier eine Gelegenheit zur Anwendung der theoretischen Erkenntnisse besteht.

Die Verschiebungen von Punkten werden als Differenz von zweimal unabhängig bestimmten Koordinaten dargestellt. Die Gewichtskoeffizienten der Verschiebungen sind gleich der Summe der Gewichtskoeffizienten der Koordinaten in den verglichenen Epochen. Eine gemeinsame Ausgleichung mehrerer Epochen ergibt unter ihnen eine Abhängigkeit, sofern allen Epochen gemeinsame, aber von einer Epoche zur andern nicht veränderliche Unbekannte drin enthalten sind, oder das alle Epochen umfassende Netz durch eine Helmerttransformation in ein Festpunktfeld eingepasst wird. Unveränderlich zwischen allen Epochen, aber unbekannt sind beispielsweise Lotabweichungen oder auch gewisse Festpunkte. Die gegenseitige Abhängigkeit der Epochen bleibt ohne Einfluss auf die Verschiebungsgenauigkeit, wenn den verglichenen Epochen identische Netze zugrunde liegen. Da für Genauigkeitsschätzungen identische Netze vorausgesetzt werden, darf man für die Gewichtskoeffizienten der Verschiebungen das $\sqrt{2}$ -fache der Gewichtskoeffizienten der Koordinaten in unabhängigen Epochen einsetzen, wobei die allen Epochen gemeinsame Unbekannten weggelassen (Lotabweichungen) oder als bekannt eingesetzt werden können (Festpunkte).

Eine gemeinsame Ausgleichung von Eichmessungen, unbekanntem Strecken und unbekanntem Zwischenpunkten des Eichpolygons ergibt eine gegenseitige Abhängigkeit der unbekanntem Strecken. Die wichtigste Konsequenz davon ist, dass Basen, die aus Polygonzügen abgeleitet werden, wesentlich ungenauer als bisher angenommen sind. Der mittlere Fehler einer einmal mit einem Draht gemessenen Strecke wird dagegen etwas genauer als üblicherweise erwartet wird. Er ist nur ausnahmsweise höher als $\pm 0,1$ mm, meist um $\pm 0,06 - \pm 0,08$ mm. Die Ausgleichung gibt auch Auskunft über die Konstanz der Drahtlängen und der einzelnen Eichstrecken. Es zeigt sich, dass Invarbänder bedeutend stabiler als Invardrähte sind. Jede Messanlage weist nach den Untersuchungsergebnissen zu wenig Eichstrecken auf.

Die fehlertheoretische Untersuchung der Modellnetze zielt auf eine Verbesserung der Bestimmungsgenauigkeit von Verschiebungen ab. Dabei ergibt sich, dass dreidimensionale Ausgleichungen wohl höhere Genauigkeiten liefern, dass der Gewinn aber nicht wesentlich ist. Eine Massstabseinführung ins Netz durch Basen, deren Längen aus Polygonzügen abgeleitet sind, ergibt auch nur unwesentlich höhere Genauigkeiten als die Einzwängung des Netzes in Festpunkte. Die Genauigkeit lässt sich durch Verteilung der Festpunkte rings um das Untersuchungsobjekt - anstelle nur einseitiger Festpunkte - bedeutend mehr steigern, als durch optimale Ansätze in der Ausgleichung. Elektronische Distanzmesser der Genauigkeit des Mekometers von Froome und Bradsell (National Physical Laboratory, Teddington) werden Genauigkeitssteigerungen je nach dem Netz auf mindestens das doppelte der bisher erreichten Genauigkeiten bringen.

Am Beispiel der Staumauer Limmernboden wird der Einfluss verschiedener Netze gezeigt. Die Aussagen über die Festpunktstabilität, die aus den übrigen Festpunkten des Netzes abgeleitet werden, sind von einem Festpunkt zum andern sehr verschieden genau, dagegen ändern sich die Genauigkeiten der Verschiebungen der Mauerpunkte bei verschiedenen Festpunktverteilungen nur wenig. Die Refraktion ist in den kleinen, topographisch stark gegliederten Gebieten nicht sehr konstant. Die mittleren Fehler der Gewichtseinheit sind daher aus dreidimensionalen Ausgleichungen relativ hoch. Ebene Ausgleichungen ergeben günstigere Werte, die aber noch durch Lotabweichungseinflüsse verfälscht sind. Man muss in Netzen mit sehr steilen Visuren und grossen Lotabweichungen - wie es für Limmernboden zutrifft - mit Werten um $\pm 3^{\text{cc}}$ - $\pm 4^{\text{cc}}$ rechnen. Die Konfidenzellipsen für 95% Sicherheit für Verschiebungen von Netzpunkten mit gegenseitigen Visuren erreichen in den grossen Halbachsen Beträge von etwa ± 3 mm, vorwärts eingeschnittene Punkte werden etwa halb so genau. Die Polygonpunkte haben ebenfalls Konfidenzellipsen in der Grösse von Triangulationspunkten. Feste Zugsenden können die Genauigkeit verdoppeln.