

Die Schweremessungen der Schweizerischen Geodätischen Kommission

Autor(en): **Hunziker, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie**

Band (Jahr): **57 (1959)**

Heft 4

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-215213>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie

Revue technique Suisse des Mensurations, du Génie rural et de Photogrammétrie

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik; Schweiz. Kulturingenieurverein; Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie

Editeur: Société suisse des Mensurations et Améliorations foncières; Société suisse des Ingénieurs du Génie rural; Société suisse de Photogrammétrie

Nr. 4 • LVII. Jahrgang

Erscheint monatlich

15. April 1959

Die Schweremessungen der Schweizerischen Geodätischen Kommission

Von Dr. E. Hunziker, Zürich

Wenn von Schwerkraftmessungen, Schweremessungen oder Bestimmungen der Schwere die Rede ist, wird darunter stets eine Messung der Schwerebeschleunigung g verstanden.

Messungen der absoluten Größe der Schwerebeschleunigung

Die Schlagdauer D oder halbe Periode $T/2$ eines mathematischen Pendels von der Länge l beträgt im luftleeren Raum bei unendlich kleiner Schwingungsamplitude

$$D = \frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Zur Bestimmung der Schwerebeschleunigung g müßte man also D und l messen. Aus Beobachtungen mit einem Reversionspendel läßt sich die Länge l' eines mathematischen Pendels ableiten, das eine Schlagdauer von einer Sekunde mittlerer Zeit hat. Kennt man l' , so ist

$$g = \pi^2 \cdot l'$$

Die Messung der absoluten Größe der Schwerebeschleunigung g gilt als ein ungemein schwieriges Unternehmen. Dementsprechend haben während langer Zeit nur von wenigen Punkten der Erdoberfläche Bestimmungen vorgelegen, die hohen Ansprüchen genügen.

Schon im Jahre 1862, kurz nach ihrer Gründung, nahm die Schweizerische Geodätische Kommission absolute Schweremessungen in ihr Programm auf. Sie beschloß, ein Reversionspendel zu verwenden, über dessen Konstruktion eingehende Angaben von Bessel vorlagen. Das Pendel, mit dem in den Jahren 1864 bis 1867 E. Plantamour in Genf und auf dem Rigi beobachtete, kam als erstes Instrument dieser Art aus der

Werkstatt der bekannten Instrumentenbauer Repsold und Söhne in Hamburg.

Um einen Begriff von den Ansprüchen dieser Methode der absoluten Schweremessungen zu geben, lassen wir ein paar kurze Angaben über die in Teddington bei London vorgenommene Bestimmung folgen; sie erstreckte sich über die Jahre 1936 bis 1938. Die gemessene Pendellänge, das heißt der Abstand zwischen den beiden Schneiden, wies einen mittleren Fehler von $\pm 0,25 \mu$ auf. Die Schärfe der Schneiden war so groß, daß ihr Krümmungsradius kleiner als 20μ angenommen werden konnte. Die innere Übereinstimmung der Messungen ergab einen mittleren Fehler der gefundenen Schwerebeschleunigung von $\pm 1,4$ mgal.

In neuerer Zeit sind die folgenden Bezeichnungen üblich:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-2} &= 1 \text{ Gal,} \\ 1 \cdot 10^3 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-2} &= 1 \text{ Kilogal,} \\ 1 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-2} &= 1 \text{ Milligal, abgekürzt 1 mgal.} \end{aligned}$$

In diesen Einheiten ausgedrückt, hat man für die neu abgeleitete Schwerebeschleunigung der Fundamentalstation Zürich, Geodätisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule:

$$0,980667 \text{ Kilogal} = 980,667 \text{ Gal} = 980\,667 \text{ mgal.}$$

Doch nun zurück zu Plantamour. Er hat seine Messungen den damaligen Kenntnissen entsprechend mit großer Umsicht und Sorgfalt ausgeführt. Das geht schon aus dem verblüffend kleinen mittleren Fehler hervor, mit dem er die Schwere von Genf erhielt: $980\,424,6 \pm 2,1$ mgal. Aber auch dieser mittlere Fehler bezieht sich bloß auf die innere Genauigkeit; über die systematischen Fehler, herrührend von der Unvollkommenheit der damals zur Verfügung stehenden Mittel, gibt er keine Auskunft. So ist es denn nicht verwunderlich, daß der von Plantamour abgeleitete Wert um ungefähr 150 mgal zu klein ausfiel. Steigt man auf der Erdoberfläche in der Ost-West-Richtung von einer Ausgangsstation auf eine 100 m höher gelegene Station, so nimmt die Schwerebeschleunigung um rund 20 mgal ab. In diesem Sinne entsprechen 150 mgal einem Höhenunterschied von 750 m. Gegenwärtig gibt man die Meereshöhe einer Gravimeterstation auf Zentimeter genau an. Durch all dies wird die Messung Plantamours nicht angetastet; sie bleibt für die damalige Zeit eine bemerkenswerte Leistung.

Mit dem gleichen von E. Plantamour benützten Reversionspendel hat im Jahre 1889 J. B. Messerschmitt in Zürich eine Absolutbestimmung ausgeführt. Die von ihm gefundene Schwerebeschleunigung

$$g = 980\,676 \pm 2 \text{ mgal}$$

bezieht sich auf einen jetzt abgebrochenen Pendelpfeiler im Keller der Eidgenössischen Sternwarte in Zürich. Aus der gegenwärtig angenommenen Schwerebeschleunigung der Fundamentalstation geht für den

eben genannten Pfeiler ein Wert von 980665 mgal hervor. Der Unterschied beläuft sich also nur auf 11 mgal.

Bis auf weiteres werden nach internationaler Übereinkunft die Schwerebeschleunigungen im sogenannten Potsdamer System angegeben. Diesem liegt eine in den Jahren 1898 bis 1904 ausgeführte Bestimmung zugrunde. Sie wurde mit verbesserten Reversionspendeln und Beobachtungsmethoden vorgenommen. Trotzdem besteht die begründete Annahme, daß der allgemein anerkannte Ausgangswert

$$g_{\text{Potsdam}} = 981274 \text{ mgal}$$

einer Korrektur von der Größenordnung — 13 mgal bedürfe.

Messerschmitt muß nicht nur gut beobachtet, sondern es dürfte seinen Messungen auch ein freundlicher Zufall zu Gevatter gestanden haben, daß seine mit derart einfachen Mitteln ausgeführte Bestimmung einen so guten Wert geliefert hat.

Bestimmungen mit dem Sterneckschen Pendelapparat

Sehr viel einfacher als die absolute Größe der Schwerebeschleunigung läßt sich das Verhältnis der Schwerebeschleunigungen zweier Stationen bestimmen. Mißt man die Schlagdauer ein und desselben Pendels sowohl auf der Station P als auch auf der Station P' , so ist:

$$\frac{D^2}{D'^2} = \frac{g'}{g}$$

Kennt man die Schwerebeschleunigung g auf einer Referenzstation, so läßt sich aus der Schlagdauer D auf der Referenzstation und D' auf einer beliebigen anderen Station der Schwereunterschied mittels des Ausdruckes

$$g' - g = g \left(\frac{D^2}{D'^2} - 1 \right)$$

ableiten. Die Länge des verwendeten Pendels braucht also nicht gemessen zu werden.

Zur Bestimmung der Differenzen zwischen den Schwerebeschleunigungen auf einer Referenzstation und auf beliebigen weiteren Stationen eignet sich vor allem der vom österreichischen Major von Sterneck im Jahre 1887 konstruierte und später vervollkommnete Pendelapparat. Die Pendellänge beträgt 25 cm, die Schlagdauer ungefähr eine halbe Sekunde.

Im Auftrage der Geodätischen Kommission hat J. B. Messerschmitt in den Jahren 1892 bis 1898 auf mehr als 70 Stationen mit einem Sterneckschen Pendelapparat beobachtet. In den ersten Jahren betrug die erreichte Genauigkeit einer Schweredifferenz ± 10 mgal; später, bei Gebrauch eines neuen Chronometers, ging der mittlere Fehler auf ± 4 mgal zurück.

Die Schweremessungen mit dem Sterneckschen Pendelapparat sind im Jahre 1900 von Th. Niethammer wiederaufgenommen worden. Verschiedene Verbesserungen, unter anderem die Verwendung einer Pendeluhr an Stelle eines Chronometers, brachten eine neue Steigerung der Genauigkeit mit sich.

Im Jahre 1905 stellte die Direktion der Eidgenössischen Landestopographie an die Geodätische Kommission das Gesuch, weitere Schwerebestimmungen durchführen zu lassen, parallel fortschreitend mit dem Präzisionsnivellement. Das Gesuch führt 73 Stationen auf. Auch in den darauf folgenden 13 Jahren ist bei der Wahl der Stationen oft auf den Wunsch der Landestopographie abgestellt worden.

Im ganzen hat Th. Niethammer auf 231 schweizerischen Stationen Pendelbeobachtungen ausgeführt¹; es fällt also durchschnittlich eine Station auf 170 km². Es ist noch erwähnenswert, was für einen Zeitaufwand die Messungen auf einer Station erforderte. Deren Einrichtung, die Beobachtungen, provisorischen Reduktionen, Verpackung der Instrumente und Transport zur nächsten Station benötigten eine Woche bis zu zehn Tagen. Es mußten ja nicht nur die Schwingungszeiten der Pendel beobachtet, sondern auch astronomische Zeitbestimmungen vorgenommen werden. Drahtlos gesendete wissenschaftliche Zeitzeichen gab es damals noch nicht.

Als Referenzstation diente die damalige astronomische Anstalt Bernoullianum in Basel. Die Differenz zwischen den Schwerebeschleunigungen auf einer Feldstation und in Basel weist nach den Angaben von Th. Niethammer im Durchschnitt einen mittleren Fehler von rund ± 1 mgal auf. Die Messungen fielen in die Sommerhalbjahre der Jahre 1900 bis 1918.

Um aus den beobachteten Differenzen die Schwerebeschleunigungen auf den Feldstationen ableiten zu können, muß die Schwerebeschleunigung der Referenzstation bekannt sein. Diese ist mit Pendelbeobachtungen gleicher Art festgelegt worden. Gemessen wurden die Anschlüsse an Potsdam – die Fundamentalstation des in Europa verwendeten Potsdamer Systems – sowie an Karlsruhe. Die Differenz Karlsruhe–Basel ist nicht nur von schweizerischer, sondern unabhängig davon auch von deutscher Seite bestimmt worden. Die Anschlußmessungen fielen in die Jahre 1902 und 1905.

Es zeigten sich nun merkwürdige Ergebnisse. Die aus schweizerischen und deutschen Beobachtungen hervorgehenden zwei Werte der Schwereferenz Karlsruhe–Basel stimmten bis auf 0,5 mgal miteinander überein. Hingegen wich die daraus abgeleitete Schwerebeschleunigung von Basel um 9 mgal ab vom Wert, der aus dem direkten Anschluß Potsdam–Basel hervorging. Während der Messungen der Differenz Potsdam–Basel hatten sich gewisse Veränderungen an den Pendeln bemerkbar gemacht. Deshalb wurde auf das Ergebnis des Anschlusses an

¹ Veröffentlicht in den Bänden 12, 13, 15 und 16 der «Astronomisch-geodätischen Arbeiten in der Schweiz», herausgegeben von der SGK.

Karlsruhe abgestellt und daraus die Schwerebeschleunigung der Referenzstation Basel bestimmt.

Später, im Jahre 1929, ausgeführte deutsche Messungen haben einwandfrei gezeigt, daß der im Potsdamer System für Karlsruhe bisher angenommene Schwerewert, und damit auch das g der Referenzstation Basel, einer Korrektur von -10 mgal bedarf. Berücksichtigt man diese Korrektur, so geben die von Th. Niethammer bestimmten Anschlüsse an Potsdam und an Karlsruhe bis auf 1 mgal die gleiche Schwerebeschleunigung für Basel. Die Zuverlässigkeit der seinerzeit angezweifelten Differenz Potsdam–Basel ist also glänzend zutage getreten.

Die Schwerebeschleunigungen hängen stark von der Meereshöhe der Stationen ab. Um Schlüsse auf die Massenverteilung in der Erdrinde ziehen zu können, müssen die beobachteten Werte miteinander vergleichbar gemacht werden. Dies kann so geschehen, daß man sich alle Massen über dem Geoid wegdenkt und dann auf rechnerischem Wege die Schwere ableitet, die sich nun in der Höhe Null der Lotlinie durch die Station ergeben würde. Je nachdem dieser Wert größer oder kleiner als die Normalschwere im Meeresniveau ausfällt – man nennt diesen Unterschied Schwereabweichung –, liegt ein Massenüberschuß oder ein Massendefekt vor. In der Schweiz laufen die Kurven gleicher Schwereabweichung im großen und ganzen ungefähr parallel zur Alpenkette. Mit Ausnahme der beiden Stationen Basel und Brissago treten in der Schweiz nur negative Werte, also Massendefekte, auf.

Die Reduktion an der Erdoberfläche beobachteter Schwerebeschleunigungen auf Meeresniveau geht leider mit einem beträchtlichen Genauigkeitsverlust Hand in Hand. Seine Hauptursache liegt darin, daß man die Massenverteilung zwischen der Erdoberfläche und dem Geoid nur genähert kennt. Es läßt sich deshalb nicht vermeiden, über die Dichte dieser Massen mehr oder weniger unrichtige Annahmen zu treffen. Die Unsicherheit der Schwereabweichungen beträgt schätzungsweise und durchschnittlich im schweizerischen Mittelland ± 1 bis 2 mgal, bei Stationen in Gebirgsnähe ± 3 bis 4 mgal und bei einer Anzahl im Gebirge gelegener Stationen ± 5 bis 8 mgal.

Statische Schweremessungen

Alle bis jetzt besprochenen Bestimmungen der Schwerebeschleunigung beruhen auf den Gesetzen der Dynamik; es wird die Zeitdauer beobachtet, die ein Körper braucht, um aus einer bestimmten Lage in eine andere zu kommen. Die in neuerer Zeit vorgenommenen statischen Schweremessungen gehen von den Gesetzen der Statik aus. Es sind verschiedene Instrumente entwickelt worden. Wir beschränken uns hier auf die Arbeiten mit einem Worden-Gravimeter, ausgeführt in den Jahren 1953 bis 1957.

Das Worden-Gravimeter, gebaut von der Firma «Texas Instruments Incorporated» in Houston, Texas, ist im wesentlichen ein Vertikalseismograph nach dem Hebeltypus mit Ewingscher Astasierung. In der Mitte

einer horizontalen Drehachse ist ein waagrechter Arm angebracht, der an seinem freien Ende die kleine Masse m trägt. Dem Drehmoment, das diese Masse auf die Achse ausübt, wirken zwei feine, nach oben ziehende Quarzfedern entgegen. Die Zugkraft dieser Federn wird mittels zweier Schrauben gemessen. Um das Gleichgewicht herzustellen, müssen bei zunehmender Schwerebeschleunigung die Federn stärker gespannt werden. Schon aus dieser kurzen Beschreibung geht hervor, daß das Instrument einer Eichung bedarf. Der bewegliche Teil des Instrumentes ist in eine Kammer eingebaut; der Luftdruck darin beträgt 5 bis 10 mm Hg.

Die Gehäuse der Worden-Gravimeter haben die Form eines stehenden Zylinders. Das verwendete Instrument Nr. 26, Eigentum des Institutes für Geophysik an der ETH, wies eine Höhe von 26 cm und einen Durchmesser von 11 cm auf. Sein Gewicht betrug 2,5 kg.

Der Teilwert der Trommel der großen Schraube belief sich auf 1 Trommelteil ~ 4 mgal, der Teilwert der Trommel der kleinen Schraube auf $\sim 0,1$ mgal. Wurden noch Zehntel geschätzt, so erhielt man eine Einstellgenauigkeit, die 0,01 mgal entspricht. Mit alleiniger Betätigung der kleinen Schraube – bei unveränderter Stellung der großen Schraube – ließen sich Schweredifferenzen bis zu ungefähr 70 mgal messen. Um größere Schweredifferenzen in einem Schritt zu bestimmen, mußte auch die große Schraube benutzt werden, was aber eine merkliche Verringerung der Genauigkeit mit sich brachte.

Im Herbst 1956 mußte das Instrument zur Überholung an die Erstellerfirma nach Texas geschickt werden. Auf dem Rücktransport erlitt es trotz sorgfältigster Verpackung so große Schäden, daß es nicht mehr instand gestellt werden konnte. Der Ankauf des Instrumentes zum Preise von 40 000 Franken fiel in das Jahr 1949; sein Verlust wurde durch Versicherungen gedeckt. Mit einem im Jahre 1957 geliehenen Worden-Gravimeter, geodätisches Modell, konnte im Bereich von 305 mgal gemessen werden, ohne daß es einer Verstellung der großen Schraube bedurfte.

Der Bezug einer Station mit Aufstellung des Instrumentes auf einem Pfeiler oder auf einem ungefähr 50 cm hohen Stativ, Beobachten und Abbrechen benötigen nur ein paar Minuten. Stellt man zu verschiedenen Zeiten auf der gleichen Station ein Worden-Gravimeter ein, so erhält man nicht die gleichen Ablesungen. Diese Erscheinung wird «Drift» genannt. Das Worden-Gravimeter Nr. 26 wies durchschnittlich in einem Tag eine Drift von $+ 1$ mgal auf. Während der Feldarbeiten konnte aber die Drift an wolkenlosen Sommertagen auf 0,30 mgal in einer Stunde anwachsen. Um die Drift unschädlich zu machen, beobachtet man geschlossene Schleifen, oder man kehrt nach dem Bezug einer Station B sogleich auf die Ausgangsstation A zurück und wiederholt das Ganze einmal oder mehrere Male. Die Schweredifferenz zwischen den Punkten A und B kann zum Beispiel nach dem von F. Gassmann, leitendem Mitglied für die Schwerebestimmungen der SGK, angegebenen Verfahren² aus der Beob-

² «Zur Messung der Schweredifferenz zwischen zwei Punkten mit einem statischen Gravimeter», veröffentlicht als Annex zum Procès-verbal der Sitzung der SGK vom 31. Mai 1958.

achtungsreihe $A_1 - B_1 - A_2 - B_2 - A_3 - B_3$ abgeleitet werden, wobei mit A_1 der erste, mit A_2 der zweite und mit A_3 der dritte Bezug der Station A bezeichnet wird. Entsprechende Bedeutung haben B_1, B_2, B_3 . Nach diesem Beobachtungsschema ist bei den Messungen auf den Linien des schweizerischen Schweregrundnetzes gearbeitet worden, was also eine dreimalige Hin- und Herfahrt zwischen den beiden Stationen A und B erforderte. Bei der Auswertung der Beobachtungen wird angenommen, die Drift verlaufe proportional zur Zeit.

Das schweizerische Schweregrundnetz

Um den neuzeitlichen Genauigkeitsanforderungen zu entsprechen, beschloß die Schweizerische Geodätische Kommission, ein neues Schwere-netz, das schweizerische Schweregrundnetz, zu erstellen. Die hohen Genauigkeitsansprüche verlangten das Innehalten verschiedener Bedingungen. Unter anderen:

Die Stationen mußten mit Fixpunkten des eidgenössischen Präzisionsnivellements zusammenfallen. Besonders zu bevorzugen waren Punkte, in deren Nähe früher Pendelbeobachtungen ausgeführt wurden.

Mit Rücksicht auf die Eigenschaften des Worden-Gravimeters war darauf zu achten, daß der Unterschied zwischen den Schwerebeschleunigungen benachbarter Stationen 50 mgal nicht wesentlich überstieg.

Benachbarte Stationen durften nur so weit auseinanderliegen, daß zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bezügen der gleichen Station nicht mehr als zwei Stunden verflossen.

Der Großteil des Netzes sollte aus geschlossenen Schleifen bestehen.

Das gewählte Netz besteht aus sieben geschlossenen Schleifen, die durchwegs von Linien des eidgenössischen Präzisionsnivellements gebildet werden. Ferner gehören die zwei offenen Züge Martigny-Grand-St-Bernard und Castione-Brissago dazu. Die Lage und die Form der Netzlinien sind aus der Kartenbeilage ersichtlich, ebenso die Verteilung der Gravimeterstationen.

Das Netz zählt 123 Stationen, von denen 107 in den geschlossenen Schleifen und 16 in den offen angeschlossenen Zweigen liegen. Die drei Stationen Zürich-Fundamentalstation, Kloten-Flughafen und Locarno-Flugplatz sind die einzigen, die nicht mit Fixpunkten des eidgenössischen Präzisionsnivellements zusammenfallen. Im ganzen weisen die 7 Schleifen 112 Intervalle auf. Die Länge der einzelnen Schleifen schwankt zwischen 248 und 325 km, die durchschnittliche Entfernung benachbarter Stationen einer Schleife zwischen 8,7 und 18,1 km.

Die Messungen nach dem oben genannten Schema wurden vom Autor ausgeführt, wobei also stets die Schweredifferenz zwischen zwei benachbarten Stationen für sich allein und ohne jede Verquickung mit anderen Stationen bestimmt worden ist.

Eine einzelne beobachtete Schweredifferenz weist einen mittleren Fehler von der Größenordnung $\pm 0,025$ mgal auf. Dieser Fehler ist so klein, daß man auch die im Laufe eines Tages von Sonne und Mond ver-

ursachten Schwereänderungen in Betracht ziehen muß. Je nach Stellung von Sonne und Mond kann die Änderung der Schwerebeschleunigung in unserer Breite bis 0,2 mgal im Verlaufe von 6 Stunden betragen.

Es zeigte sich, daß das gewählte Beobachtungs- und Reduktionsverfahren erlaubt, den Einfluß der täglichen Veränderung zu vernachlässigen. Er fällt infolge Differenzbildung zum größten Teil weg. Um was für Beträge die einzelnen Beobachtungen zu korrigieren gewesen wären, geht aus den folgenden Angaben hervor. Es handelt sich dabei um die größten aufgetretenen Korrekturen:

Olten, 19. Oktober 1953, Beobachtung um 0,10 mgal zu groß;

Luzern, 22. Oktober 1953, Beobachtung um 0,09 mgal zu groß;

Bern, 31. Mai 1954, Beobachtung um 0,14 mgal zu klein;

Rümlingen, 29. Juni 1954, Beobachtung um 0,16 mgal zu klein.

Die große Empfindlichkeit eines Gravimeters verlangt, daß der Aufstellungsort des Instruments nach Lage und nach Höhe auf Zentimeter genau eingemessen wird. Eine Höhenänderung in freier Luft von nur 3 cm bewirkt ja schon eine Änderung der Schwerebeschleunigung von 0,01 mgal, oder wenn statt auf dem rund 50 cm hohen Stativ auf dem Bodenpunkt aufgestellt wird, so entspricht dem eine Schwereänderung von 0,15 mgal.

Es ist gebräuchlich, bei Gravimetermessungen die Schleifenschlußfehler anzugeben. Im Gegensatz zu Nivellementsschleifen sollte der Schlußfehler hier gleich Null sein. Die absoluten Beträge der Schlußfehler der Schleifen 1 bis 6 liegen zwischen den Grenzen 0,01 und 0,09 mgal. Der nicht mit der Schleife 6 zusammenfallende Teil der Schleife 7 wurde in die Berechnung des Widerspruches der Schleife 6 einbezogen. Die sechs Schlußfehler sind durch Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate zum Verschwinden gebracht worden.

Um die immer noch in Trommeleinheiten ausgedrückten ausgeglichenen Schweredifferenzen in Milligal umrechnen zu können, mußte die Trommeleinheit bestimmt werden. Dazu dienten die 44 an das Gravimeternetz angeschlossenen Pendelstationen. Es ergab sich, daß zehn Trommeleinheiten des Worden-Gravimeters Nr. 26 $1,0060 \pm 0,0010$ mgal entsprechen. Eine mittels dieser Trommeleinheit gerechnete Schweredifferenz von 100 mgal ist demnach mit einem von der Eichung herührenden mittleren Fehler von $\pm 0,1$ mgal behaftet und die größte im Schwerenetz auftretende Differenz im Betrage von 700 mgal, zwischen den Stationen Basel-Grand-St-Bernard, mit einem mittleren Fehler von $\pm 0,7$ mgal. Man sieht daraus, daß die Eichung eines Gravimeters das kritischste Element darstellt.

Die eben besprochene Eichung fußte vollständig auf schweizerischen Messungen. Um eine Kontrolle zu erhalten, wurden – ebenfalls im Auftrage der Schweizerischen Geodätischen Kommission – von P. Gleinsvik noch auf der Eichstrecke Paris-Toulouse-Bagnères Beobachtungen ausgeführt. Ihre Auswertung zeigte, daß der aus rein schweizerischen Messungen – Pendel- und Gravimeterbeobachtungen – abgeleitete Wert der Trommeleinheit des Worden-Gravimeters Nr. 26 um rund $1,5\text{‰}$ ver-

Schwerebeschleunigungen in einem Bande der Reihe «Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz», herausgegeben von der Schweizerischen Geodätischen Kommission, steht demnächst bevor.

Es liegt nahe, nach dem Zweck eines solchen Schwerenetzes zu fragen. Entsprechend einem Triangulationsnetz höherer Ordnung kann das Schweregrundnetz den Detailaufnahmen als Rahmen dienen. Bereits sind vom Institut für Geophysik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule und vom Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne zahlreiche gravimetrische Einzelaufnahmen ausgeführt worden. Zur Erforschung des Untergrundes wird geplant, das schweizerische Tertiärbecken, ein Gebiet von rund 13000 km², mit einer Stationsdichte von einer Station auf den km² aufzunehmen. Auch von geologischer Seite werden Gravimetermessungen herangezogen.

Im Mai 1955 tagte in Florenz die Internationale Kommission für die Ausgleichung der europäischen Nivellementsnetze. Diese Kommission der «Association Internationale de Géodésie» beschloß, daß jedes Land seinen Anteil am «Réseau Européen Unifié de Nivellement» zu bearbeiten habe. In der Schweiz fällt der Großteil der zu behandelnden Linien mit dem Schweregrundnetz zusammen. Ferner wurde in Florenz empfohlen, eine charakteristische Nivellementslinie auszuwählen und auf dieser die Schwerebeschleunigung in sehr kurzen Intervallen zu messen. Schon im Herbst 1955 ging die Geodätische Kommission an die Aufnahme einer solchen Testlinie. Die Wahl fiel auf die Schleife 7 des Schweregrundnetzes, identisch mit dem Polygon XVII des eidgenössischen Präzisionsnivellements: Castione–Airolo–St.-Gotthard-Paß–Andermatt–Oberalppaß–Disentis–Flims–Reichenau–Splügen–Passo del San Bernardino–Mesocco–Castione. Sowohl die Aufnahme des Schweregrundnetzes wie auch der eben genannten Testschleife sind in enger Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Landestopographie und mit Unterstützung durch die Abteilung für Heeresmotorisierung des Eidgenössischen Militärdepartements ausgeführt worden.

Im ganzen zählte die Testschleife 549 Gravimeterstationen. Bei ihrer Wahl wurde auf die folgenden Bedingungen geachtet: Der Höhenunterschied zwischen zwei benachbarten Stationen durfte 36 m nicht übersteigen. Dem entspricht bei starkem Gefälle der Paßstraßen eine Horizontaldistanz von 250 bis 300 m. Ferner wurde in ebenem Gebiet die Entfernung benachbarter Stationen auf einen Kilometer begrenzt. Wenn immer möglich, fiel die Wahl auf Bolzen und Niete des Präzisionsnivellements. Die Meereshöhen der übrigen Stationen wurden barometrisch bestimmt.

Die gravimetrische Einschaltung der neuen Punkte in die bereits vorhandenen Stationen des Schweregrundnetzes geschah mit einer etwas geringeren Genauigkeit, als sie die Stationen des Schweregrundnetzes aufweisen. Ihre Schwerebeschleunigungen und Meereshöhen sowie die Beschreibung ihrer Lage werden ebenfalls im oben erwähnten, von der Geodätischen Kommission herausgegebenen Bande veröffentlicht und damit weiterer Ausschöpfung zugänglich gemacht werden.

An der Tagung in Florenz beschloß die «Association Internationale de Géodésie» zur Berechnung des

Réseau Européen Unifié de Nivellement (REUN)

sogenannte geopotentielle Koten einzuführen.

Die Arbeit, die im Schwerfeld geleistet werden muß, um die Maße 1 von einer Referenz-Niveaufläche auf eine andere Niveaufläche zu heben, wird geopotentielle Kote genannt. Die Differenz Δc der geopotentiellen Koten zwischen zwei benachbarten Stationen ist das Produkt aus dem Nivellementsergebnis und dem Mittelwert der Schwerebeschleunigung in diesem Intervall, ausgedrückt in Meter \times Kilogal, der sogenannten geopotentiellen Einheit. Daraus geht hervor, daß die geopotentielle Kote eines Punktes, ausgedrückt in geopotentiellen Einheiten, um rund 2% kleiner ausfällt als die nivellierte Höhe h in Metern.

Die geopotentielle Kote c kann dargestellt werden durch:

$$c = \int g \cdot dh.$$

Diese Größe ist unabhängig vom durchschrittenen Weg, das heißt vom Weg, auf dem nivelliert wurde. Sie läßt sich genügend genau rechnen mittels des Ausdruckes:

$$c = \sum_A^B \left[\frac{g_i + g_k}{2} \cdot \Delta h_i^k \right].$$

Es besteht nun eine einfache Beziehung zwischen der orthometrischen Höhe H – dem Abstand des Punktes P auf der Erdoberfläche vom Geoid, gemessen auf der Lotlinie – und der geopotentiellen Kote. Die orthometrische Höhe H ist gleich der geopotentiellen Kote c , dividiert durch den mittleren Schwerewert \bar{g} längs der Lotlinie. Soll \bar{g} möglichst zuverlässig bestimmt werden, so erfordert dies einen sehr großen Arbeitsaufwand, den man wohl für vereinzelt Stationen, aber nicht für die große Anzahl von Nivellementsfixpunkten auf sich nehmen wird. Das anspruchsvolle \bar{g} läßt sich auch näherungsweise rechnen, doch je einfacher das Vorgehen, um so größer die Vernachlässigungen. Es bedeutet also eine salomonisch weise Lösung, das REUN mit geopotentiellen Koten zu berechnen und es offen zu lassen, ob und mit welchem Arbeitsaufwand in einem bestimmten Falle die so einfach zu definierenden und so mühsam zu rechnenden orthometrischen Höhen abgeleitet werden sollen.

Wir wenden uns nun wieder den auf schweizerisches Gebiet fallenden Linien des REUN zu. In der Kartenbeilage sind sie schwarz eingezeichnet. Sie lassen sich gliedern in:

ein Umfangspolygon Lausanne–Neuenburg–Olten–Kaiserstuhl–Schaffhausen–Rorschach–Sargans–Reichenau–Oberalppaß–Furkapaß–Brig–Martigny–Lausanne;

eine Diagonale Basel–Olten–Luzern–Schwyz–St.-Gotthard-Paß–Bellinzona–Chiasso;

die Auslandsanschlüsse Lausanne–Genf–Moillesullaz; Schaffhausen–Bietingen und Landquart–Davos–Flüelapaß–Süs–Martinsbruck–Vinadi.

Die Linien des Schweregrundnetzes sind in der Kartenbeilage rot eingetragen. Wie man sieht, fällt im Gebiet der Schweiz ein Großteil des REUN mit Linien des Schweregrundnetzes zusammen.

Vor den Messungen auf den Linien des REUN blieb abzuklären, wie groß die Stationsdichte anzusetzen sei, damit die verlangte Genauigkeit der geopotentiellen Knoten gewährleistet werde. Eine Untersuchung der Messungen in der Testschleife ergab die folgende Faustregel:

In verhältnismäßig ebenem Gebiet können benachbarte Stationen bis 4 km voneinander entfernt liegen;

im Gebiet mit mittleren Höhenunterschieden sollen die Distanzen kleiner bleiben als 2 km und die Höhenunterschiede 50 m nicht übersteigen;

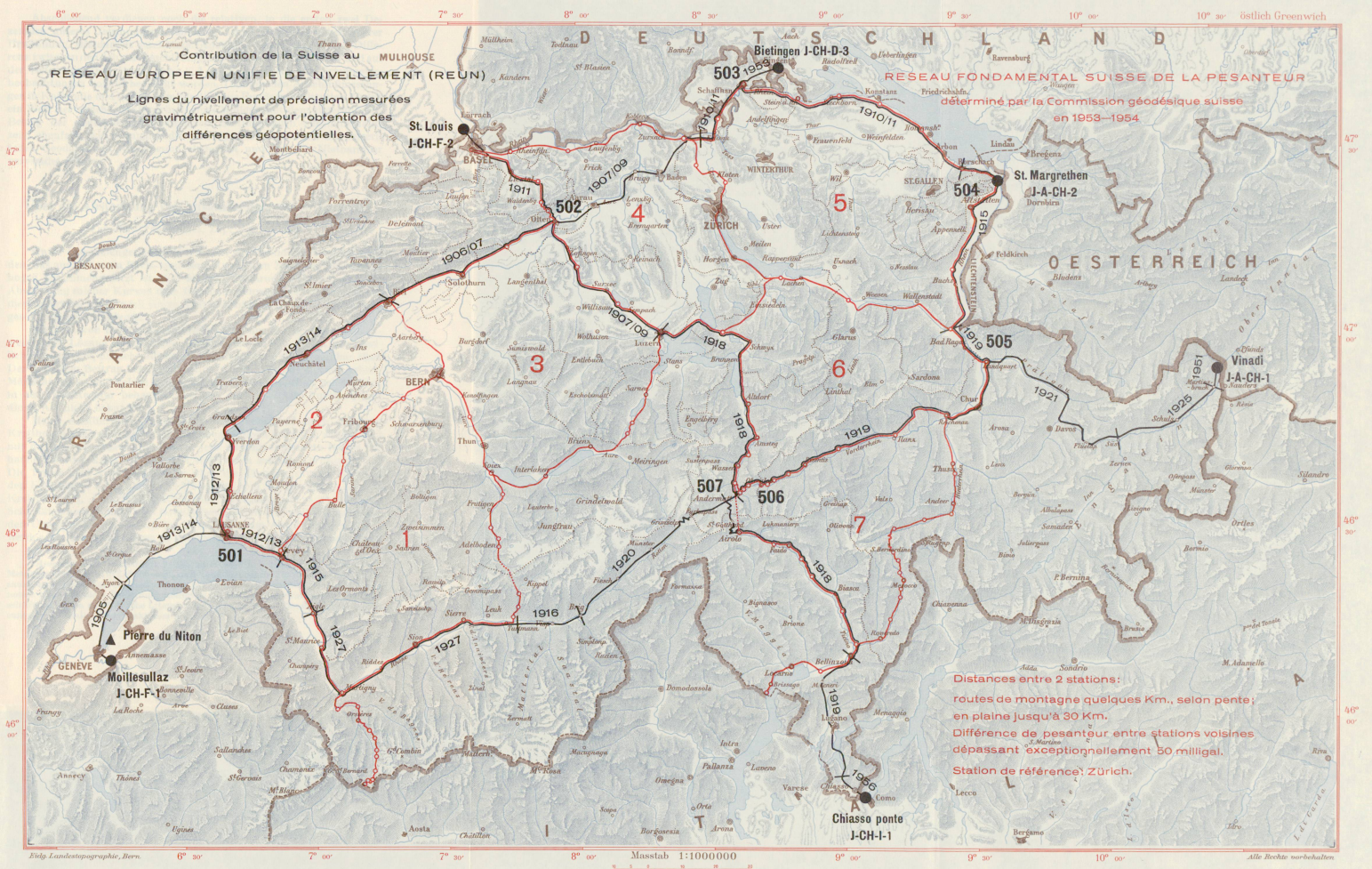
bei steiler Straßenführung betragen die Grenzen 1,5 km für die Entfernung und 100 m für den Höhenunterschied.

Im gesamten liegen auf dem schweizerischen Anteil am REUN 864 Gravimeterstationen. Von den 492 im Sommerhalbjahr 1956 neu bestimmten Stationen fallen 460 zusammen mit Fixpunkten des Präzisionsnivellements, 2 sind Triangulationspunkte, und 30 neue Stationen mußten als Zwischenpunkte eingeschaltet werden. Auf den ersten Blick mag es recht absonderlich anmuten, daß es genügt, die Meereshöhen dieser Zwischenpunkte barometrisch mit einer Genauigkeit von ungefähr ± 1 m festzulegen, während die Nivellementshöhenunterschiede auf 0,01 mm genau in die Rechnung eingeführt wurden. Die Erklärung liegt darin, daß den Zwischenpunkten näherungsweise nur die Funktion eines Rechnungsträgers zukommt, dessen Genauigkeit nicht groß zu sein braucht.

In der bevorstehenden Veröffentlichung der Geodätischen Kommission wird man eine kurze Beschreibung aller Gravimeterstationen finden sowie die Verzeichnisse der Schwerewerte, bezogen auf den Instrumentenstandpunkt, auf den Bodenpunkt und auf den Nivellementsfixpunkt.

Die gravimetrischen Messungen sind von N. Wunderlin ausgeführt worden; die umfangreiche Berechnung der geopotentiellen Knoten und deren Weiterleitung an das Zentralbüro der «Association Internationale de Géodésie» hat die Eidgenössische Landestopographie besorgt.

Rückblickend auf die bis heute ausgeführten schweizerischen Bestimmungen der Schwerebeschleunigung wird einem bewußt, wie sehr in der verhältnismäßig kurzen Zeit von nicht ganz einem Jahrhundert sich die Auffassungen, die verwendeten Methoden und Instrumente geändert haben. Man braucht nur an die Unbefangenheit zu denken, mit der ehemals absolute Schweremessungen vorgenommen wurden, und damit den gewaltigen Apparat und die langwierigen Vorarbeiten zu vergleichen, mit denen an neuzeitliche Messungen herangegangen wird. Viele Hilfsmittel, wie Quarzuhren, Oszillographen, Photozellen, elektrische Funkenchronographen, die bei kleiner Papiergeschwindigkeit Ablesungen von $\frac{1}{10\,000}$ sec. zulassen, und andere mehr stehen ja erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit zur Verfügung.



Abschließend verdienen noch die relativen, in die ersten zwei Dezzennien unseres Jahrhunderts fallenden Schweremessungen besonderer Erwähnung. Die damals geschätzte Genauigkeit einer gemessenen Differenz zwischen den Schwerebeschleunigungen auf einer Feldstation und auf der Referenzstation Basel, von ± 1 mgal, ist durch die Gravimeterbeobachtungen vollauf bestätigt worden. Daß aus den Anschlußmessungen in Karlsruhe und in Potsdam für die neue Fundamentalstation Zürich ein Wert hervorgeht, der innerhalb eines Milligals mit dem abgerundeten Betrag der neuesten gravimetrischen Bestimmungen zusammenfällt, zeigt ebenfalls, wie vorzüglich die damaligen Mittel von der Schweizerischen Geodätischen Kommission eingesetzt und von Th. Niethammer verwendet wurden.

Über die Absteckung von zusammengesetzten Kurven

Von Ivan Tomkiewicz, Dipl.-Ing., Aarau

Unter zusammengesetzter Kurve soll ein Gebilde verstanden werden, das aus mehreren Kreis- und der notwendigen Zahl von Übergangsbogen zusammengesetzt ist. Aus eigener Erfahrung weiß ich, daß die Absteckung solcher Kurven dem Ingenieur Schwierigkeiten bereitet. In diesem Artikel möchte ich einige Absteckungsmethoden für zusammengesetzte Kurven darlegen.

Ich gehe von einer etwas komplizierten, nur auf gewisse Fälle anwendbaren Lösung aus und gelange dann zu andern, leicht verständlichen Lösungen, die sehr allgemein und in jedem Fall anwendbar sind. Der in diesem Beitrag behandelte Stoff ist das Ergebnis eigener Arbeit. Möglicherweise sind solche oder ähnliche Methoden schon gelegentlich in der Fachliteratur behandelt worden, doch sind mir Publikationen dieser Art nicht bekannt¹.

Meine Ausführungen beziehen sich zunächst auf einen aus zwei Kreisbogen zusammengesetzten Korbogen, doch wird sich zeigen, daß mit den vorgeschlagenen Methoden jede zusammengesetzte Kurve behandelt werden kann. Abbildung 1 stellt einen solchen Korbogen dar. Die Trasse geht von der Geraden über die Übergangskurve L_1, R_1 in den Kreisbogen l_1, R_1 über. Der Übergang vom Kreisbogen l_1, R_1 zum Kreisbogen l_2, R_2 erfolgt mittels des Übergangsbogens R_1, R_2, L_3 . Schließlich kommt man vom Kreisbogen l_2, R_2 in die zweite Gerade über den Übergangsbogen L_2, R_2 . Da es sich hier um Autobahnen handelt, werden die Übergangsbogen in der Form von Klothoiden ausgebildet.

¹ *Anmerkung der Redaktion:* Artikel über die von I. Tomkiewicz behandelten Methoden finden sich in Lehrbüchern und in Zeitschriften. Da der Absteckung zusammengesetzter Kurven im Zusammenhang mit dem Ausbau unseres Straßennetzes immer größere Bedeutung zukommt, werden die Schweizer Leser der Zeitschrift, denen die ausländische Literatur wenig bekannt ist, den vorliegenden Aufsatz aus der Feder eines Praktikers begrüßen.