

PRÄZISIONSLÄNGENBESTIMMUNG VON KOMPARATORBASEN IN EINEM KERNKRAFTWERK IM BAU

K. HORVÁTH—O. L'AUNÉ

Lehrstuhl für Vermessungskunde, Geodätisches Institut, TU Budapest, H-1521

(Eingegangen am 11. Februar 1982)

PRECISE DETERMINATION OF COMPARATOR BASIS LENGTHS IN A NUCLEAR POWER STATION UNDER CONSTRUCTION — Lengths of five comparator bases of common origin but different lengths on the site of a nuclear power station now under construction have been precisely determined in order to calibrate measuring tapes used in the design and construction of the nuclear power station according to the same unit — „international standard meter” — at an accuracy of ± 0.2 mm.

High-precision length determination of the pair of standard meters applied in measurements relied on the method of so-called „statistical calibration”, complemented by applications of a laser interferometer and of a universal measuring device assisted technically by the National Office of Metrology.

The achieved precision indices render the comparator basis lines suitable — beside conventional measuring tape calibrations — for determining constants of small and medium range electro-optical telemeters including MEKOMETER of the highest precision.

Von dem *Geodätischen Institut der Technischen Universität Budapest* wurden geodätische Präzisionsmessungen für die hochgenaue Streckenbestimmung von fünf Vergleichs-Komparatorbasen vorgegebener Längen, auf dem Gelände des *Kernkraftwerks Paks* vorgenommen.

Die Präzisionsbestimmung der Längen der Vergleichsbasislinien war für den Auftraggeber deshalb notwendig, damit die Längen der bei den Projektierungs-, Absteckungs- und Überwachungsarbeiten angewandten Meßbänder in der gleichen Maßeinheit — in dem gesetzlichen Meter — mit einer absoluten Genauigkeit von etwa $\pm 0,2$ mm bestimmt werden können.

Die Komparatorbasen wurden in der Nähe des Südeingangs des Kraftwerkes, parallel zu der Grundmauer des Bürogebäudes angelegt. Unter Berücksichtigung der bei der Projektierung und Ausführung am häufigsten angewandten Konstruktionslängen wurden die vorgegebenen Längen der Vergleichsbasen — mit dem gleichen Anfangspunkt — in etwa 1,0 m; 12,0 m; 24,0 m; 39,0 m und 50,0 m festgelegt. Als Punktzeichen, d. h. als Indexstriche der Basen, wurden die O-Teilungen von Messingplatten mit mm-Einteilung, die mittels Zementmörtels in Betonblöcken befestigt waren, benutzt. Die Betonblöcke haben einen Querschnitt von 0,4 m \times 0,4 m und etwa 1,0 m Gründungstiefe; ein oberer Streifen der Blöcke ist annähernd eben ausgebildet und horizontal angeordnet. Um die Auflage des Meßgeräts zu gewährleisten, wurde zwischen den die Indexplatten enthaltenden Betonblöcken eine etwa 0,4 m

breite Betongründung mit durchschnittlich 0,3 m Gründungstiefe angelegt, die stellenweise durch Dilatationsfugen von 0,02 m unterbrochen ist. Die Umgebung der Betonunterlage der Basis besteht aus mit Unkraut bewachsenem Boden, die Oberkante der Betonblöcke und der durchgehenden Betonunterlage ist mit der Bodenoberfläche in der Umgebung in annähernd gleicher Höhe. Als unser Institut den Auftrag erhielt, war die beschriebene Ausgestaltung der Basis bereits seit einigen Jahren fertiggestellt. Nach den Anordnungsverhältnissen der Basis, der Gründungstiefe, der konstruktiven Ausführung der die Indexplatten enthaltenden Betonblöcke schien die Annahme gerechtfertigt zu sein, daß auf Wirkung von Änderungen der Bodenfeuchtigkeit sowie des Aggregatzustands dieses Feuchtigkeitsgehalt — Wasser bzw. Eis — die durch die O-Striche der Einteilung auf den Platten bezeichneten Endpunkte der Basis ihre gegenseitige Lage systematisch oder zufällig verändern können. Es mußte also ermittelt werden, ob mit einer Längenänderung der Basis zu rechnen sei. Auch die tatsächliche Länge der Basis war mit der bei Projektierung und Ausführung erforderlichen Genauigkeit nicht bekannt; infolge all dieser Umstände schien die wiederholte, präzise Längenbestimmung der Vergleichsbasis — unter verschiedenen meteorologischen Verhältnissen — begründet zu sein.

Die Genauigkeitsanforderung erforderte die Durchführung der folgenden Aufgaben:

- a) die Wahl des Meßverfahrens,
- b) die hochgenaue Längenbestimmung der bei den Messungen angewandten Meßgeräte,
- c) die Durchführung der Meßreihen,
- d) die Feststellung der Längen der Vergleichsbasis, sowie der Zuverlässigkeitsmeßzahlen der bestimmten Längen.

Das Meßverfahren umfaßte die in verschiedenen Jahreszeiten und bei verschiedenen atmosphärischen Parametern (Temperatur, Feuchtigkeit usw.) wiederholten Meßreihen, die benutzte Geräteausrüstung, die Zahl der Wiederholungen bei den Messungen sowie die Verminderung, bzw. unter günstigen Bedingungen, die Elimination der Ablesefehler bei den Messungen der Restglieder.

Die absolute und relative Lage der Endpunkte der angelegten Basis wird durch horizontale (und vertikale) Bewegungen der die Endpunktzeichen enthaltenden Betonblöcke beeinflußt, die durch folgende Ursachen herbeigeführt werden können: Temperaturänderung, Änderung der Bodenfeuchtigkeit und des Aggregatzustands der Feuchtigkeit, Verkehr auf der und in der Nähe der Betonunterlage der Basis, durch Wurzeln des Rasens in der Umgebung der Betonunterlage verursachte Bewegungen usw. Unter Berücksichtigung des Gesagten wurden eine durch sommerliche Temperaturparameter gekennzeichnete Messung bei etwa $+20^{\circ}\text{C}$ und eine in der kalten Jahreszeit, oder unmittelbar

nach einer Frostperiode, um ± 0 °C durchgeführte Messung für begründet gehalten.

Die erste Meßreihe wurde am 18–19. September 1980, bei einer Mitteltemperatur von $+22$ °C, die zweite am 11–12. Februar 1981 bei einer Mitteltemperatur von $+2$ °C vorgenommen. Bei beiden Gelegenheiten wurden, um die Längen der fünf Vergleichsbasen zu bestimmen, an aufeinanderfolgenden Tagen je fünf voneinander unabhängige Messungen unternommen. „Voneinander unabhängige Messungen“ bedeutete, daß die Endpunkte aller Basen im Verhältnis zu dem gemeinsamen Anfangspunkt getrennt bestimmt wurden; so



Abb. 1. Längenmessung eines Komparators mit Normalmeter

sind die für die Längen der Vergleichsbasen aus den Meßreihen abgeleiteten Ergebnisse nicht nur voneinander unabhängig, sondern auch von gleichem Gewicht — gleicher Genauigkeit.

Zu der Präzisionslängenbestimmung der Vergleichsbasis wurden das Normalmeterpaar *Bamberg* 6036/a und 6036/b — in Verwaltung des Geodätischen Instituts —, ferner ein 4 m langes Basislattenpaar mit \perp -Querschnitt und rot-schwarzer Farbenzusammenstellung benutzt. Die tatsächliche Länge der Normalmeter läßt sich bei jeder Meßtemperatur mit einer effektiven Meßgenauigkeit von ± 10 μ bestimmen, infolge der hygroskopischen Eigenschaft des Werkstoffes hängt die Länge der Basislatten von dem Feuchtigkeitsgehalt derselben ab. Unser Institut ist im Besitz der hochgenauen Komparationser-



Abb. 2. Längenbestimmung eines Komparators mit Normalmeterpaar und Meßkeil

gebnisse der benutzten Basislatten für die Periode von November 1932 bis Februar 1981; diese Werte sind in einem Komparatorprotokoll dokumentiert.

Die kombinierte Verwendung der Normalmeter und der Basislatten war bei der Präzisionslängenbestimmung jeder Vergleichsbasis unvermeidlich, deren annähernde Länge kein ganzes Vielfaches der Länge der angewandten 4 m-Basislatte ist. So kamen beide Meßgeräte zur kombinierten Verwendung bei der Längenbestimmung der 39 m und der 50 m langen Basis. In diesen Fällen mußte gewährleistet werden, daß die horizontalen Endkanten der Basislatten in der Achsenlinie der vertikalen Endkanten der Normalmeter zusammenstoßen. Das wurde mit Hilfe von gehobelten Unterlagsbrettern zweckmäßiger Dicke und Länge (1 m bzw. 2 m), mit parallelen Seitenflächen — die also eigentlich ebenparallel waren — erreicht.

Die für die Gewährleistung der vorgeschriebenen Genauigkeit erforderliche Wiederholungszahl wurde durch vorherige Fehlerprüfung ermittelt. Es ergab sich, daß die vorgeschriebene Genauigkeit von $\pm 0,2$ mm bei fünffacher Wiederholung gewährleistet sei. Trotzdem wurde bei beiden Meßreihen (von September und von Februar) eine zehnfache Wiederholungszahl angewandt. Dadurch wurde die erreichbare tatsächliche Genauigkeit neben der Erhöhung der Wiederholungszahl auch infolgedessen erhöht, daß die beiden fünffachen Meßreihen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt wurden, wodurch



Abb. 3. Komparation einer Meßplatte mit Hilfe des Komparators

die Fehler in der Bestimmung der tatsächlichen Temperatur der Normalmeter zum Teil eine zufällige Verteilung erhielten.

Die angewandte Geräteausrüstung und die bei den Messungen angewandte Wiederholungszahl sind dafür geeignet, die erforderliche Genauigkeit vollkommen zu gewährleisten; unter Berücksichtigung dieses Umstands wird die erreichbare tatsächliche Genauigkeit durch die Ablesungsfehler der Restglieder beeinflusst. Die Restglieder wurden von den Millimeter-Einteilungen der in die Betonblöcke einbetonierten Skalen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm abgelesen.

Von der Projektion der horizontalen Endkanten der bei der Messung benutzten Meßgeräte wurde bereits gesprochen. Die Schätzung des Zehntels der Teilung wurde durch die Ablesung mittels eines 4-fachen linearen Vergrößerungsglases und der vierfachen Wiederholungszahl vermindert, bzw. mit Rücksicht auf die vorgeschriebene Genauigkeit praktisch eliminiert.

Die erreichbare Genauigkeit wird dadurch entscheidend beeinflusst, daß die tatsächliche Länge der benutzten Meßgeräte mit höchster Genauigkeit bekannt sei. Um die Genauigkeit zu erhöhen, begnügten wir uns nicht mit der angegebenen Gleichung des angewandten Normalmeterpaares (*Bamberg 6036/a* und *6037/b*), aus der im Prinzip die Länge der Normalmeter bei der jeweiligen Meßtemperatur mit $\pm 10 \mu$ Genauigkeit bestimmt werden kann.

Um die tatsächliche Genauigkeit zu erhöhen, wurde das in unserem Institut entwickelte, statistische Komparationsverfahren herangezogen.

Es ist bekannt, daß bei der Komparation des Meßbandes oder der Basislatte der Fehler des Normalmeters als konstanter Fehler die Komparationsgenauigkeit beeinflußt. So oft man auch die Komparation des Meßgeräts mit dem gleichen Normalmeterpaar wiederholt, wird der konstante Fehler des Normalmeters mit der tatsächlichen Größe das Ergebnis belasten. Es sei z. B. bei einem 20 m langen Band der konstante Fehler gleich 0,2 mm, so kann dieser Wert als die tatsächliche oder effektive Genauigkeit der Bandkomparation betrachtet werden; es ist also in Anbetracht des konstanten Fehlers ein minimaler Fehler.

Wird die Komparation nicht mit einem einzigen, sondern mit mehreren Normalmeterpaaren vorgenommen, enthält das arithmetische Mittel der Komparationsergebnisse schon einen wesentlich kleineren konstanten Fehler, vorausgesetzt, daß die Fehler der angewandten Normalmeter eine zufällige Verteilung haben. Dieses Verfahren ist aber ziemlich umständlich, obwohl es die Genauigkeit wesentlich erhöht. Wird die Komparation mit acht Normalmeterpaaren vorgenommen und werden diese in jeder Kombination zusammengestellt und so viele Wiederholungen durchgeführt, daß man 120 Meßergebnisse habe, läßt sich der mittlere Fehler auf etwa ein Viertel herabsetzen.

Im konkreten Falle wurde ein anderes, viel allgemeineres Verfahren zur Verminderung des Fehlers angewandt.

Eines der Forschungsthemen des Geodätischen Instituts an der TU Budapest ist die Bestimmung des die Meßgenauigkeit vermindernenden konstanten Fehlers aus den Messungen selbst. Im Institut wurde ein Verfahren entwickelt und dessen kritische Prüfung und experimenteller Nachweis vorgenommen. Zweck dieses experimentellen Nachweises ist, neue Gleichungen der Normalmeter zu bestimmen. Das Wesen des Verfahrens ist, die Methode zur statistischen Komparation zu erarbeiten. Das Grundprinzip der Methode ist wie folgt.

Die Länge des Normalmeters ist eigentlich ein *fiktives* Meßergebnis; die Länge ist nämlich kein direkter Meßwert, sondern sie wird als Funktion von Meßergebnissen berechnet (sie ist nämlich von den gemessenen Temperaturen wesentlich abhängig). Die statistische Komparation weicht im wesentlichen von der üblichen Komparation signifikant ab, da bei Anwendung des statistischen Verfahrens der Vergleich zu einem Etalon durchgeführt wird, der bezüglich der Genauigkeit höherer Ordnung ist. Der Etalon ist eine statistische Vielheit, die Menge der Längen der in die Prüfung einbezogenen Normalmeter.

Im vorliegenden Falle waren zehn Normalmeter mit gleichen Querschnitten gegeben. Bei sechs Normalmetern waren die Endkanten aufeinander senkrecht, bei vier Normalmetern zueinander parallel. Die Messungen wurden so organisiert, daß eine konstante, jedoch unbekannte Entfernung abgesteckt

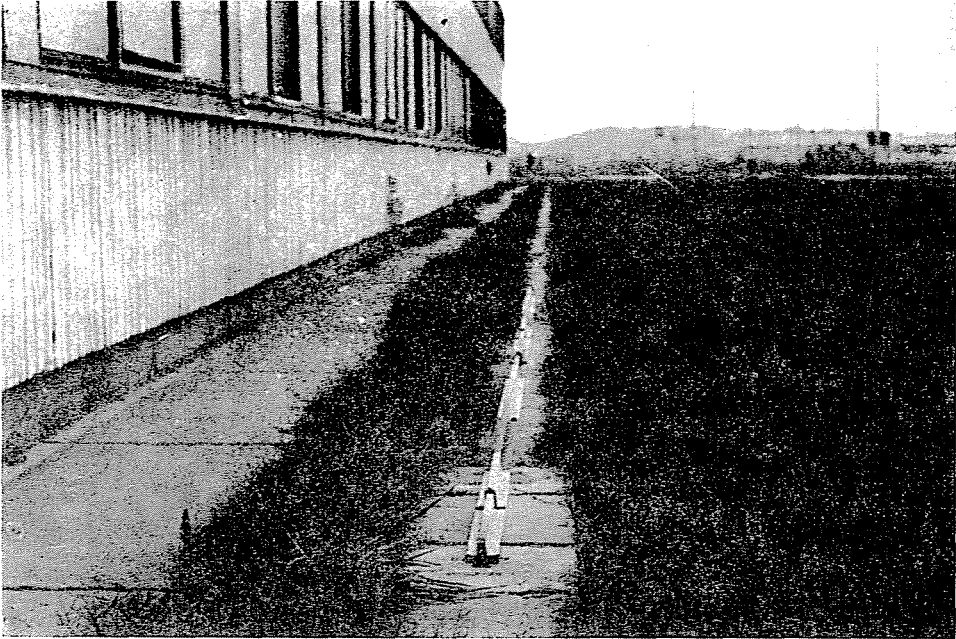


Abb. 4. Vergleichsbasis mit den Basislatten

wurde, die Länge dieser Versuchsbasis überstieg 1 m um kaum einige Zehntel-millimeter.

Die abgesteckte Entfernung wurde mit allen Normalmetern mit fünf-maliger Wiederholung gemessen.

Der arithmetische Mittelwert der unter Anwendung sämtlicher Normal-meter durchgeführten Meßreihe ist frei von zufälligem Fehler, enthält aber die Fehler im reinen Glied des Normalmeters (im konstanten Glied der Gleichung des Normalmeters).

Das Meßverfahren hat zwei problematische Operationen, welche die erreichbare Genauigkeit beeinflussen. Die eine ist die genaue Bestimmung des Restgliedes. Es handelt sich eigentlich um die Ablesung eines Indexes, die mit hoher Genauigkeit durchzuführen ist, und so daß sie nur einen zufälligen Fehler enthalte. Die andere schwierige Operation ist die Temperaturmessung. Besteht zwischen der tatsächlichen Temperatur des Normalmeters und der gemessenen Lufttemperatur ein Unterschied von 1 °C, so wird nach der Gleichung des Normalmeters der Fehler der Längenbestimmung $\pm 0,01$ mm sein. Dieser Fehler ist zu groß, die statistische Komparation wird ja unternommen, um den Fehler auf das mögliche Minimum herabzusetzen.

Die Restmessung wird mit einem *Spiralmikroskop* der *Zeiss-Werke* durchgeführt.

Die Nominalgenauigkeit des Instruments beträgt $\pm 0,1 \mu$, der tatsächliche mittlere Fehler einer Messung kann aber auf $\pm 1,5 \mu$ geschätzt werden. Wir entschieden uns deshalb für den Einsatz des Spiralmikroskops, weil dieses hochgenau und sein systematischer Fehler sehr klein ist. Nach den Angaben des Herstellerwerkes unterschreitet der periodische Fehler der Spirale die Mikron-Größenordnung.

Bei der Temperaturmessung, die wir aus der Sicht der erreichbaren Genauigkeit für die schwierigste Operation hielten, mußte mit großer Umsicht verfahren werden. Die Messung wurde mit einem Thermometer System *Beckmann*, mit $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ Gradeinteilung vorgenommen. Die beiden benutzten Thermometer wurden vorher mit vier Thermometern verschiedener Herstellung und gleicher Genauigkeit kompariert. Als Ergebnis der Komparation erwies sich der arithmetische Mittelwert aus den Ablesungen der beiden Thermometer mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ als zuverlässig.

Infolge der Wärmeträgheit des Werkstoffes nimmt der Normalmeter nicht sogleich die Temperatur des Umgebungsmikroklimas an. Dieser Vorgang — die Annahme der Temperaturparameter des umgebenden Mikroklimas — ist die Temperierung und dauert verhältnismäßig lange. Ihre Zeitdauer ist von der anfänglichen Temperaturdifferenz und von gewissen Materialkonstanten (Wärmeaufnahmevermögen, Wärmekapazität usw.) abhängig.

Nach unseren Untersuchungen beträgt die Zeitdauer der Temperierung der benutzten Normalmeter bei $5 \text{ }^\circ\text{C}$ anfänglicher Temperaturdifferenz etwa 42 Min. Dieser Wert macht darauf aufmerksam, daß die Normalmeter vor der Durchführung der Komparation für etwa 45 bis 60 Min. im Komparationsraum unterzubringen sind. Diese Bedingung läßt sich im allgemeinen leicht erfüllen, es ist jedoch mit einer ähnlichen Fehlerquelle zu rechnen, die viel problematischer ist. Es wird nämlich gefordert, daß die Abweichung der gemessenen Temperatur des Normalmeters von seiner tatsächlichen Temperatur $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschreite. Die Abweichung $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ verursacht nämlich einen mittleren Fehler von 1μ , der gleich der bei der Längenbestimmung zu erreichenden Genauigkeit ist. Nach erfolgter Temperierung stimmt die mit dem Thermometer gemessene Temperatur — innerhalb der Zuverlässigkeit der Temperaturmessung — mit der tatsächlichen Temperatur des Normalmeters überein. Auf Wirkung der Körpertemperatur des Beobachters ändert sich die tatsächliche Temperatur der Normalmeter, weil der Beobachter diese anfaßt (selbst wenn Isolierhandschuhe oder ein Asbestkissen benutzt wird), während die mit dem Thermometer gemessene Temperatur unverändert bleibt bzw. nur der Änderung des Mikroklimas folgt. Auf Wirkung der Nähe des Beobachters (der ausgeatmeten Luft usw.), sowie des Anfassens des Normalmeters mit Isolierhandschuhen steigt — nach unseren Untersuchungen — die tatsächliche Temperatur der Normalmeter in 14 Min. um etwa $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ an. (Diese Feststellung gilt



Abb. 5. Anpassung des Basislattenendes an den Anfangspunkt der Basis

für die mikroklimatischen Parameter der Testmessungen, d. h. für eine Lufttemperatur im Komparatorraum von 17°C bis 18°C .)

Unter Berücksichtigung des Umstands, daß der Zeitbedarf der Messung eines Normalmeters wesentlich unter 14 Min. liegt, scheint die Annahme begründet zu sein, daß der Normalmeter während der Messung seine Temperatur nur in vernachlässigbar geringem Maße ändert. Beträgt die Temperaturzunahme (oder Abnahme) $0,05^{\circ}\text{C}$, wird sich die Länge des Normalmeters um $0,55 \mu$ ändern.

Die Komparation des Normalmeters, um die Fehler zu vermindern oder unter günstigen Umständen zu eliminieren, wird in der Reihenfolge wie folgt durchgeführt:

1. Anordnung des Normalmeters,
2. Ablesen der beiden Thermometer mit $0,01^{\circ}\text{C}$ Schärfe,
3. Stoß der beiden Meßplatten, um das Intervall zu ermitteln,
4. nach Einstellung des Indexes Ablesung durch das Spiralmikroskop.

Die Operationen 1, 3 und 4 werden mit demselben Normalmeter nochmals wiederholt, dann werden

5. die Thermometer abgelesen.

Das genannte Meßverfahren wurde im Falle aller zehn — zu der Untersuchung herangezogenen — Normalmeter angewandt.

Rechenverlauf:

1. Die (aus der Gleichung berechnete) Länge des Normalmeters mit dem zuverlässigsten Indexablesungswert summiert, ergeben sich die Einzelwerte l_i der abgesteckten Länge. Der zuverlässigste Wert der Indexablesung läßt sich als arithmetisches Mittel von fünf Ablesungen berechnen. Der konstante Fehler ist praktisch eliminiert und auch der zufällige Fehler ist minimal.
2. Die beschriebene Operation auch mit den übrigen neun Normalmetern durchgeführt, läßt sich der zuverlässigste Wert der abgesteckten Länge l_0 berechnen. Aus dem zuverlässigsten Wert die einzelnen Werte der abgesteckten Länge in Abzug gebracht, wird die Differenz der beiden Werte gleich dem konstanten Fehler sein. Das Gesagte in Formeln angeschrieben, lautet:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= m_1 + h_1 \\
 l_2 &= m_2 + h_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 l_n &= m_n + h_n .
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Dabei bedeuten:

- l_i die mit dem i -ten Normalmeter gemessene Länge des Komparators,
- h_i die Länge des i -ten Normalmeters im Meßzeitpunkt, die Länge aus der ursprünglichen Gleichung des Normalmeters bestimmt,
- m_i der unter Anwendung des Mikroskops bei fünfmaliger Wiederholung gemessene Restbetrag,
- m_n der mittlere Fehler der ursprünglichen Gleichung des Normalmeters. Das ist der mittlere Fehler *a priori*, mit dem Wert von $m_n = \pm 10 \mu$,
- m_m der mittlere Fehler des zuverlässigsten Wertes des mit dem Mikroskop gemessenen Restbetrags, gleich $m_m = \frac{1,5}{\sqrt{5}} = \pm 0,7 \mu$.

Unter der Bedingung, daß die Fehler der Normalmeter zufällig sind, kann man die zuverlässigste Länge des Komparators anschreiben:

$$[l] = [m] + [h] \tag{2}$$

$$[l_0] = \frac{[m] + [h]}{n} . \tag{3}$$

Dieser ist mit dem mittleren Fehler

$$m_{l_0} = \sqrt{\frac{[vv]}{n(n-1)}} \tag{4}$$

behaftet, wo

$$v = l_0 - l_i . \tag{5}$$



Abb. 6. Stoß der Basislatten auf der Basis

Man kann auch den mittleren Fehler *a priori* des Komparators berechnen, u. zw. als mittleren Fehler der Funktion (3):

$$m_f = \frac{m_h}{\sqrt{n}} = \frac{10}{\sqrt{10}} = \pm 3,16 \mu (\text{Mikrometer}).$$

Die Zusammenhänge (3) und (6) können nur angeschrieben werden, wenn die Größen in der Formel nur zufällige Fehler enthalten. Die Größen *h* sind aber keine Meßergebnisse, also sind sie auch nicht meßfehlerbehaftet. Das sind nämlich Rechenergebnisse, die als fiktive Messungen behandelt werden. Ihre Fehler folgen nicht notwendigerweise, nur annähernd der Normalverteilung; dieser Umstand erfordert also weitere Untersuchung.

In erster Näherung wird Normalverteilung angenommen; im weiteren wird versucht werden, dies zu beweisen oder wenigstens die Annahme plausibel zu machen. Das beruht darauf, daß zwar die Fehler der Normalmeter systematische Fehler sind, die verschiedenen Normalmeter aber — die an verschiedenen Orten und in verschiedenen Zeiten sorgfältig kompariert worden waren — nicht mit den gleichen Fehlern behaftet sind. Durch die Verschiedenheit von Zeit und Ort wird die Annahme gerechtfertigt, daß Größe und Vorzeichen der Fehler verschieden seien, und das sorgfältige Verfahren läßt darauf schließen, daß kleine Fehler häufiger, große Fehler seltener vorkommen. Die genannten Annahmen sind aber den bei Messungen gemachten Annahmen ähnlich. Es liegt auf der Hand, daß die Normalverteilung noch des Nachweises bedarf, da ja die Fehler der Normalmeter keine Meßfehler sondern systematische, doch konstante Fehler sind. Die verglichenen Werte sind keine tatsächlichen, sondern fiktiven Meßergebnisse.

Die mit Hilfe von (5) bestimmten v -Werte sind in Tabelle I zusammengestellt:

Tabelle I

Nummer	v	vv	Nummer	v	vv
1	5	25	6	-10	100
2	-5	25	7	-6	36
3	3	9	8	2	4
4	7	49	9	0	0
5	0	0	10	5	25

Summe:

[1]

[273]

Zusammenfassung der Ergebnisse der statistischen Komparation:

1. Die mittleren Fehler der Normalmeter ($2,2 \mu$) können mittels eines verhältnismäßig einfachen Verfahrens und einer einfachen Ausrüstung vermindert werden.

2. Unter Anwendung des beschriebenen Verfahrens kann für jeden im Lande benutzten Normalmeter mit höchster Genauigkeit eine gleiche Meßeinheit bestimmt werden; das ermöglicht die genauere Bestimmung der Basen der im Lande entwickelten, selbständigen, präzisen Grundpunktnetze bzw. der Komparatorbasen.

Als Ergebnis der statistischen Komparation wurden für die bei den Messungen angewandten Normalmeter die Gleichungen aufgestellt:

$$\text{Bamberg 6036/a: } 1 \text{ m} - 0,041 + 0,011 (t - 18^\circ \text{C})$$

$$6036/b: 1 \text{ m} - 0,019 \pm 0,011 (t - 18^\circ \text{C}).$$

Dabei bedeutet t die Meßtemperatur in $^\circ\text{C}$ Einheiten, mit $0,1^\circ$ Genauigkeit.



Abb. 7. Messung einer Vergleichsbasis mit Hilfe von Basislatten

Um die statistische Komparation zu kontrollieren, wurden die Längen der angewandten Normalmeter auch von dem Landesamt für Maßwesen — das eine Vereinbarung über Zusammenarbeit mit unserem Institut getroffen hat — bestimmt, u. zw. auch mit Hilfe eines Laser-Interferometers und eines universalen Längenmeßgeräts, bei etwa zehnfacher Wiederholung. Die Bestimmung wurde für die kleinsten meßbaren Längen der Normalmeter sowie bezüglich der Achsenlinien der vertikalen und horizontalen Endkanten der Normalmeter vorgenommen. Die auf die Achsenlinien der Endkanten bezogenen Prüfungsergebnisse, die für unsere Messungen von besonderer Bedeutung sind, führten innerhalb von $\pm 2 \mu$ (Mikrometer) zu gleichen Ergebnissen wie die statistische Komparation.

Das bei den Meßserien angewandte 4 m Basislattenpaar wurde auf der Meßstelle, in der Umgebung der angelegten Vergleichsbasen — vor und nach jeder fünfmal wiederholten Meßreihe — kompariert. Für die Komparation der Basislatten an Ort und Stelle wurde ein ortsbeweglicher Komparator hergestellt, dessen Banklänge vor und nach jeder Basislattenkomparation mit den bei den Messungen benutzten Normalmeterpaaren und mit Normalkeilen bei fünfmaliger Wiederholung bestimmt wurde. Auch die Basislatten wurden unter Anwendung eines Normalkeils, bei fünfmaliger Wiederholungszahl kompariert.

In den Berechnungen wurde der Mittelwert der zuverlässigsten Werte des mit fünfmaliger Wiederholung bestimmten Basislattenpaares angenommen. Für die Meßgenauigkeiten ist es kennzeichnend, daß bei der Komparation der Basislatten vor und nach der Basismessung die ermittelten Mittelwerte durchschnittlich $\pm 0,03$ mm betragen; bezüglich der größten Abweichung stimmten sie mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05$ mm überein. Die bei der Längenbestimmung der Basislatten erreichte tatsächliche Genauigkeit ($m \cong \pm 0,02$ mm) ermöglichte die Längenbestimmung der Vergleichsbasis mit der erfordernten Genauigkeit ($m \cong \pm 0,2$ mm); diese Genauigkeit konnte nämlich unter Berücksichtigung der mit zehnfacher Wiederholung durchgeführten Meßreihen restlos gewährleistet werden.

Die Zuverlässigkeit der bestimmten Basislinienlängen darf im Wert von $\pm 0,1 - \pm 0,2$ mm angenommen werden, d. h. daß die Differenz über 0,2 mm zweier in verschiedenen Jahreszeiten, bei verschiedenen Temperaturparametern bestimmter Werte nicht auf Meßfehler zurückzuführen sei, sondern eine Folge der Bewegungen der die Zeichen der Endpunkte enthaltenden Betonblöcke, d. h. einer Längenänderung der Vergleichsbasis ist.

Zusammenfassung

Im Beitrag wird die präzise Längenbestimmung von fünf Komparatorbasen verschiedener Längen und mit gleichem Anfangspunkt behandelt, die auf dem Gelände eines Kernkraftwerkes im Bau angelegt wurden. Die präzisen geodätischen Messungen hatten den Zweck, daß die bei der Projektierung und der Ausführung des Kernkraftwerks angewandten Meßbänder in gleichen Maßeinheiten, im »internationalen, gesetzlichen Meter«, mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 0,2$ mm kompariert werden können.

Die hochgenaue Längenbestimmung des bei den Messungen angewandten Normalmeterpaares wurde nach der Methode der sogenannten »statistischen Komparation«, sowie mit der technischen Hilfeleistung des Landesamtes für Maßwesen, unter Anwendung eines Laser-Interferometers und eines universalen Längenmeßgeräts durchgeführt.

Dank der erreichten Genauigkeit sind die Komparatorbasen — neben der Durchführung herkömmlicher Meßband-Komparationen — dazu geeignet, die Konstanten elektrooptischer Streckenmeßgeräte kleiner und mittlerer Reichweite — unter diesen des die höchste Genauigkeit gewährleistenden MEKOMETERS — zu bestimmen.

Literatur

1. BÄCKSTRÖM, H.: Decimalskattningen vid avläsning av sammetriska skalor (with a summary in English). Dissertation. 158 S. Stockholm, 1928.
2. BÄCKSTRÖM, H.: Über die Dezimalgleichung beim Ablesen von Skalen. Zeitschrift für Instrumentenkunde 1930/10, 1930/11, 1930/12, 1932/3, 1932/6.
3. GOTTHARDT, E.: Zur Analyse von Meßreihen. Zeitschrift für Vermessungswesen, H. 12, 1952.
4. GUÓTH, B.: Nivellement erster Ordnung von Budapest*. Geodéziai Közlöny, 1941.
5. HOMORÓDI, L.: Fehlerquellen der Längenmessung mit Latten*. Geodéziai Közlöny, H. 1 und 2, 1944.
6. HOMORÓDI, L.: Erreichte Genauigkeit bei den Längenmessungen der neuen Polygonierung von Budapest*. Geodéziai Közlöny, 1942.

* In ungarischer Sprache

7. KLASMER: Die Fehlergesetze der Längenmessung. Zeitschr. f. Vermessungswesen, 10, 11, 1927; 1, 2, 3, 1928.
8. LABITZKE, P.: Über Halbierungsfehler bei optischen Einstellungen. D. Opt. Wochenschr. 1917. S. 49—50; 60—63; 71.
9. LABITZKE, P.: Untersuchungen über psychologisch-physiologische Bisektionsfehler. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1924.
10. L'AUNÉ, O.: Statistische Komparation*. Geodézia és Kartográfia, 1963.
11. LÜDEMANN, K.: Der Ablesefehler bei Theodoliten mit Skalenmikroskopen. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1924.
12. LÜDEMANN, K.: Über die mit dem Ausdruck »Dezimalgleichung« bezeichnete Art von regelmäßigen Fehlern bei der Zehntelschätzung im Zentimeterfelde von Nivellierlatten. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 1923.
13. MICHELSON, A. A.: On the Limit of Accuracy in Optical Measurement. Journ. Opt. Soc. of America, 8. 1924.
14. OLTAY, K.: Komparatoren*. Magyar Mérnök- és Építészegylet Közlönye, 1914.
15. OLTAY, K.: Wirkung des Ablesefehlers auf die Ergebnisse von Längenmessungen mit Invardraht*. Geodéziai Közöny, 1937.
16. PETZOLD, M.: Die Goulierschen Untersuchungen der durch Feuchtigkeit und Wärme verursachten Längenänderungen von Holzstäben. Z. f. Vermessungswesen, 7. 1902.
17. TÁRCZY-HORNOCH, A.: Eine neuerliche fehlertheoretische Untersuchung der Erg. der Bonner Nachmessung. A Soproni Bányá- és Erdőmérnöki Főisk. Közl. 1930.
18. TRÁJBER, I.: Messung der Grundlinie des Kecskeméter Triangulationsnetzes*. Geodéziai Közöny, 1928.

Dozent Dr. Kálmán HORVÁTH }
 Dozent Otto L'AUNÉ } H-1521, Budapest

* In ungarischer Sprache