

DEFORMATIONSMESSUNGEN AN EINER BRÜCKE ÜBER DEN MOSONER DONAUARM

K. HORVÁTH

Lehrstuhl für Vermessungskunde, Geodätisches Institut, TU Budapest

Eingegangen am 6. Februar 1979

I. Einleitung

Im Auftrag der Straßenverwaltungsdirektion des Ministeriums für Verkehrs- und Postwesen unternahm der Lehrstuhl für Vermessungskunde des Geodätischen Instituts an der Technischen Universität Budapest während eines Jahres Deformationsmessungen an dem Unterbau der Brücke über den *Mosoner Donauarm*.

Die Brücke wurde im Jahre 1928 nach den Plänen des bekannten ungarischen Brückenkonstruktors *József Beke* gebaut. Ihr Hauptträger war ein über die Brückenpfeiler auskragender Langerscher Balken mit Bogenaussteifung, parallele Gurten und symmetrischem Fachwerk. Diese war in Ungarn die erste Brücke mit Langerschem Balken [11], der Entwurfsverfasser berichtete über die Entwurfsgrundlagen und die Vorteile dieses Systems am Wiener Kongreß des *Internationalen Brücken- und Hochbauvereins* im Jahre 1928 [2]. Nachfolgend wurden überall in Europa mehrere Brücken ähnlichen Systems projiziert und ausgeführt.

Die Brücke wurde im zweiten Weltkrieg 1945 zerstört und in den Jahren 1945/50 nach den Plänen des *Entwurfsinstituts für Straßen- und Eisenbahnbau (UVATERV)* wiederaufgebaut. Die ursprünglichen Brückenwiderlager und -pfeiler wurden nicht neugebaut, da der Unterbau nur der Ausbesserung bedurfte.

Bei der letzten periodischen Brückenuntersuchung wurde festgestellt, daß sich bei der Durchfahrt schwerbelasteter Fahrzeuge an der Brücke wesentliche horizontale und vertikale Verschiebungen bemerkbar machen. Im Gegensatz zu der Soll-Lage liegt der Endquerträger der Brücke auf dem Brückenwiderlager auf. Auch eine Neigung des Brückenwiderlagers in Richtung des Wasserlaufes war anzunehmen. Die festgestellten Unregelmäßigkeiten schienen den Erhaltungszustand und die bestimmungsgemäße Funktion der Brücke zu gefährden, daher wurden regelmäßige Deformationsmessungen an der Brücke angeordnet. Gleichzeitig wurden an der *Hochschule für Verkehrswesen und Nachrichtentechnik* statische und Materialprüfungen an der Brückentragkonstruktion unternommen.

Zweck der Deformationsmessungen war, festzustellen, ob im Beobachtungszeitraum im Unterbau horizontale oder vertikale Bewegungen vorkommen, von welchem Umfang diese etwaigen Deformationen sind, und ob der Bestand der Brücke durch Größenordnung und regelmäßige Tendenz dieser Deformationen gefährdet sei.

Bei der Ermittlung der horizontalen und Höhenbewegungen der Brückenköpfe und Brückenpfeiler wurde eine wahre Zuverlässigkeit von Millimeter-Größenordnung angestrebt.

2. Methoden zum Messen von Horizontalbewegungen

Die horizontalen Deformationsmessungen wurden nach dem trigonometrischen Verfahren durchgeführt. Für die Aufstellungspunkte wurden vier Beobachtungspfeiler aus Beton errichtet: zwei am Nord- und zwei am Südufer des Mosoner Donauarms (Abb. 1). Die Beobachtungspfeiler bildeten ein geodätisches Rechteck, welches das Grundnetz für die Deformationsmessung ist. Um einer Senkung der Beobachtungspfeiler vorzubeugen bzw. die etwaige Senkung zu vermindern, wurden mit den Beobachtungspfeilern über der Bodenoberfläche zusammengebaute, monolithische Stahlbeton-Gründungskörper angelegt. Die Beobachtungspfeiler sind über der Oberfläche etwa 1.2 m hoch, mit $25 \simeq 25$ cm Querschnitt. Versuchsweise erhielt der Beobachtungspfeiler 4 einen Kreisquerschnitt. Als Bewehrung diente ein durch den Gründungskörper und den Teil über dem Boden durchgehendes Stahlrohr. Um eine Drillverformung der Beobachtungspfeiler infolge der ungleichen Sonnenbestrahlung zu vermeiden, wurden sie mit Ölweiß gestrichen.

Bei den Messungen wurden auf den Beobachtungspfeilern mit einem Zentrierapparat ausgerüstete *Wild*-Punktmarken angeordnet. Die zwangsläufige Zentrierung erfolgte mit Hilfe von in die obere Ebene der Pfeiler eingebauten Gewindehülsen und in diese einschraubbaren Schrauben zur Befestigung der Unterbauplatte für das Instrument und die Punktmarke. Durch diese Anordnung wurde gewährleistet, daß bei sämtlichen Messungen die theoretischen Vertikalachsen des Instruments und der Punktmarke mit einer Genauigkeit von etwa 0,05 bis 0,1 mm in dieselbe Senkrechte fallen.

Die in die Brückenwiderlager und Brückenpfeiler eingebauten Punktmarken ersetzen für die Deformationsmessungen die Objekte selbst, aus der Bewegung der Punktmarken wurde auf die Bewegung der Brückenwiderlager und -pfeiler geschlossen. Es wurden in etwa der gleichen Senkrechten je Brückenpfeiler zwei Punktmarken angeordnet, um auch die etwaige Neigung der Brückenpfeiler zu ermitteln.

Als Punktmarken dienten kreisförmige Scheiben mit roten und weißen Sektoren. Zur Vermeidung der Korrosion wurden die Punktmarken aus Alu-

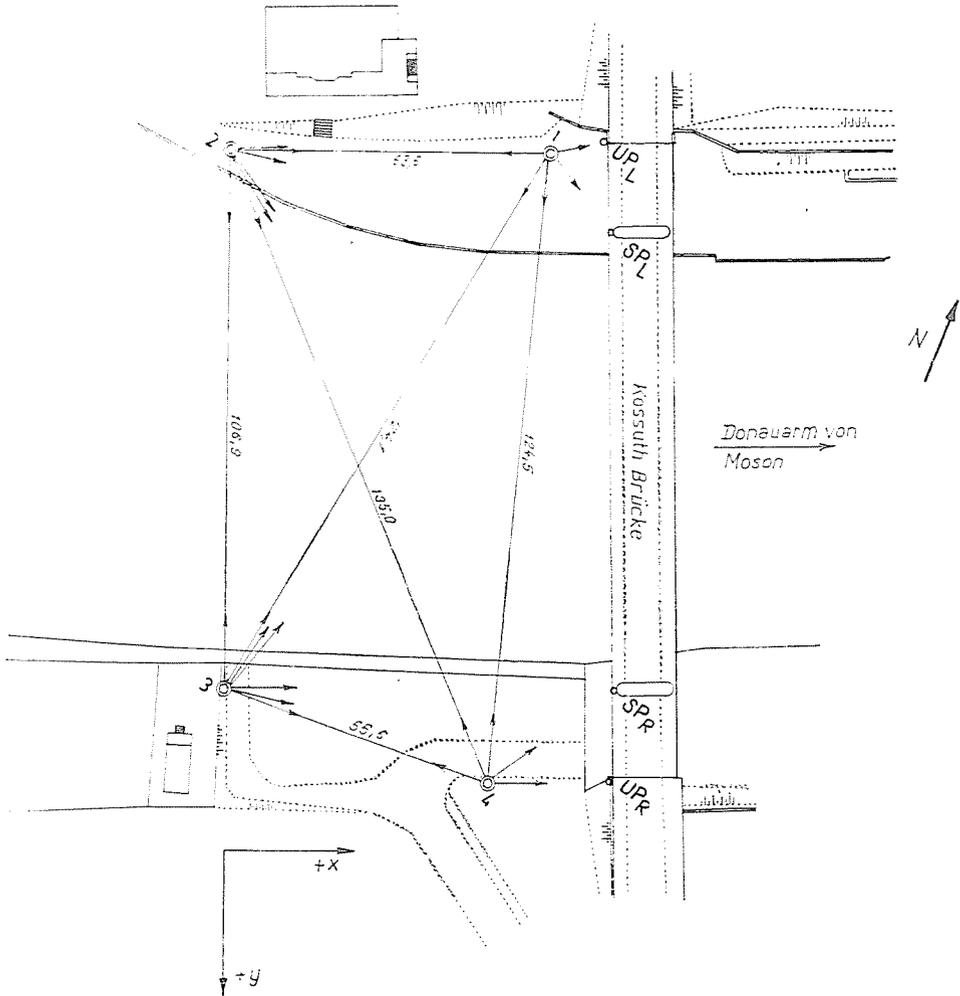


Abb. 1. Skizze des Deformationsmessungsnetzes

minium hergestellt und ihre 5 cm langen zwei Ansätze wurden mit Zementmörtel am Unterbau befestigt.

Für die Winkelmessung zur Bestimmung der horizontalen Bewegungen wurde ein Theodolit *Wild T-2* benutzt, bei von allen vier Beobachtungspfeilern in je vier Sätzen durchgeführten Richtungsmessungen. Der durchschnittliche mittlere Fehler der Richtungsmessung betrug $\pm 1''$, der größte, in den einzelnen Meßreihen vorkommende mittlere Richtungsfehler $\pm 2,0''$.

Die Beobachtungspfeiler- und Meßanordnung gestatteten, für sämtliche Deformationskontrollpunkte der Brücke aus verschiedenen Dreiecken errechnete je zwei horizontale Koordinatenpaare bzw. zwei horizontale Bewegungsvektoren zu bestimmen. Die Zuverlässigkeit der Bestimmung kann für das

Grundnetz durch dessen *Ferreroschen* mittleren Fehler, für die Deformationsmeßpunkte, einerseits, durch die in mehreren Sätzen gemessenen Richtungswerte, andererseits, für die gleichen Punkte durch die aufeinander bezogene Abweichung der aus verschiedenen Dreiecken bestimmten Koordinaten oder horizontalen Bewegungsvektoren gekennzeichnet werden. Der *Ferrerosche* mittlere Fehler des Grundnetzes blieb in 80% aller Messungen unter 2'' und überschritt in keinem Falle 3''. Die Abweichung der aus zwei verschiedenen Dreiecken bestimmten, horizontalen Bewegungsvektoren blieb in der Mehrheit der Fälle unter 1 mm. So darf der Wert von ± 1 mm als die durchschnittliche Zuverlässigkeit der Bestimmung betrachtet werden.

3. Messung der Vertikalbewegungen

Zweck der Höhenmessung war, in der Prüfungsperiode die vertikalen Bewegungen der Brückenwiderlager und -pfeiler zu bestimmen. Es wurden ein Präzisions-Nivellierinstrument *Wild* N-3 und Nivellierlatten mit Invarband benutzt. Als Höhenfestpunkte wurden 3 Festpunkte des Landesnivellierungsnetzes und 2 Festpunkte des Höhenfestpunktnetzes der Stadt *Győr* benutzt. Von den benutzten Festpunkten lagen 3 am rechten, 2 am linken Ufer, der Abstand der Festpunkte von den Brückenwiderlagern betrug 100 bis 300 m. Die unveränderte Höhenlage der Festpunkte wurde vor jeder Messung überprüft. Aus der Sicht der Messungen wurden die Brückenwiderlager und Brückenpfeiler durch Höhenmarken (I bis VIII in Abb. 2) ersetzt. In sämtlichen Ob-

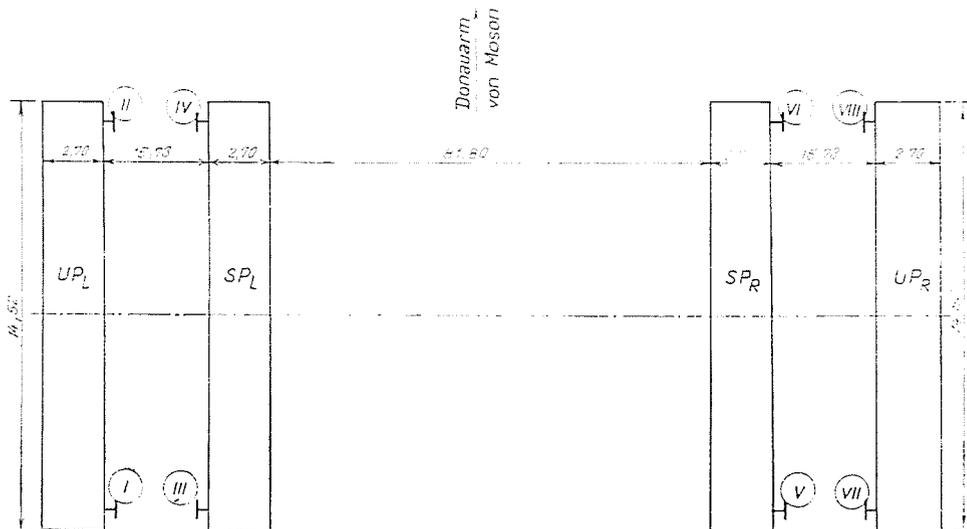


Abb. 2. Skizze der Höhenmarken

jekten des Brückenunterbaues wurden je zwei Höhenmarken angebracht, je eine am West- und am Ostende der Brückenwiderlager und der Brückenpfeiler. Unter Berücksichtigung der Gründungskörperabmessungen wurden die Nivelementsmarken in einem verhältnismäßig großen Abstand voneinander von 13,0 bis 13,5 m angeordnet. Durch diese Anordnung der Höhenmarken war es möglich festzustellen, ob die Senkung der einzelnen Objekte des Brückenunterbaues von gleicher oder ungleicher Tendenz sei.

4. Verarbeitung der Meßergebnisse

4.1 Horizontalbewegungen

Bei der Ermittlung von Horizontalbewegungen werden im allgemeinen aufgrund jeder Messung die Koordinaten der in die Brückenwiderlager und -pfeiler eingebauten Punktmarken, und aus den für dieselben Punktmarken in verschiedenen Zeitpunkten — bei verschiedenen Messungen — erhaltenen Koordinatenabweichungen direkt die Bewegungsvektoren in Richtung der Koordinatenachsen bestimmt. Für die Ermittlung der Bewegungen sind aber die bestimmten Koordinaten, als Rechenergebnisse, im Wesentlichen nicht notwendig, daher lag es auf der Hand, statt der Koordinaten direkt die Bewegungsvektoren zu bestimmen. Dieses Rechenverfahren wurde von OTTÓ L'AUNÉ 1975 in Verbindung mit den Deformationsmessungen an einer Donaubrücke beschrieben [10]. Für das Rechenverfahren wird die lineare Algebra herangezogen, und es beruht auf der Annahme, daß bei kleinen Deformationen die Bewegungen der Punktmarken in Richtung der Koordinatenachsen den gemessenen Richtungsabweichungen proportional sind, daher die Bewegungsvektoren mit Hilfe von einfachen linearen Zusammenhängen berechnet werden können. Strenggenommen ist diese Annahme bis zu einer Winkeländerung von 6° richtig, da aber bei den behandelten Deformationsmessungen lediglich — als Randwerte — Winkeländerungen von einigen Sekunden vorkommen, war die Anwendung des Verfahrens hinsichtlich der Berechnungsgenauigkeit gerechtfertigt.

Der Gedankengang des hier angewendeten Rechenverfahrens [10] ist wie folgt. Die Koordinate x_p eines Bewegungsüberwachungspunktes P ist von den — aus dem in vier Sätzen gemessenen Mittelwert der Richtungen berechneten — Vorwärtseinschnittswinkeln α und β abhängig:

$$x_p = f_x(\alpha, \beta).$$

Die Beziehung gilt auch für die Werte nach der Bewegung:

$$x'_p = f_x(\alpha', \beta').$$

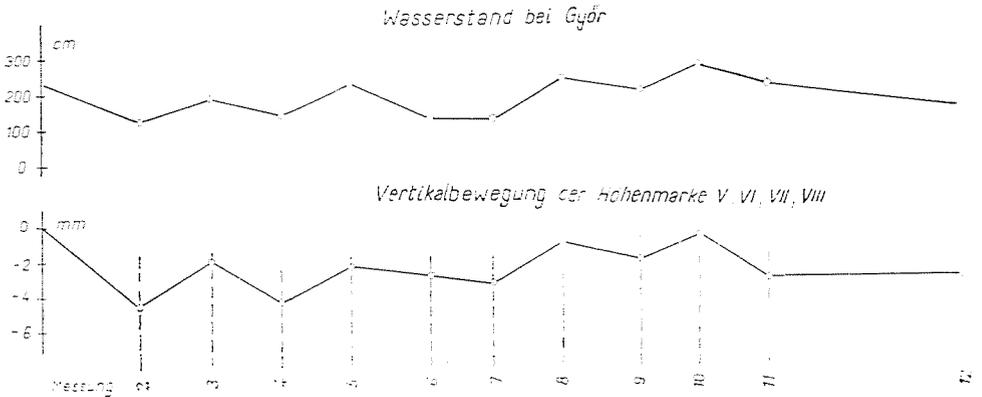


Abb. 3. Wasserstand- und Pfeilerbewegungsdiagramm

Die Bewegung in Richtung der x -Achse ist also:

$$x'_p - x_p = f_x(\alpha', \beta') - f_x(\alpha, \beta).$$

Zwischen den der ursprünglichen Lage entsprechenden Vorwärtseinschnittswinkeln α und β sowie den Winkeln α' und β' im Zustand nach erfolgter Bewegung können die Beziehungen angeschrieben werden:

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$$

$$\beta' = \beta + \Delta\beta.$$

Die in Abhängigkeit von kleinen Winkeländerungen $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$ erfolgte Koordinatenänderung wird in der Form geschrieben:

$$x'_p - x_p = \Delta x = \frac{\partial f_x}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial f_x}{\partial \beta} \Delta\beta.$$

Die partiellen Ableitungen durch a_x , b_x bezeichnet:

$$\Delta x = a_x \Delta\alpha + b_x \Delta\beta.$$

Für die Bewegung in Richtung der y -Achse schreibt man in ähnlicher Weise:

$$\Delta y = a_y \Delta\alpha + b_y \Delta\beta.$$

Die Winkeländerungen $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$ sind die auf die erste Messung als Grundmessung bezogenen Abweichungen der bei dem Vorwärtseinschnitt

benutzten inneren Winkel, die sich aus den Meßergebnissen direkt berechnen lassen.

Die für die markierten Punkte des Unterbaues ermittelten Bewegungen sind in Tafel 1 zusammengefaßt.

Bezeichnungen für den Brückenunterbau:

- UP_L = linksseitiger Uferpfeiler (nördliches Brückenwiderlager)
- SP_L = linksseitiger Stropfpfeiler
- SP_R = rechtsseitiger Stropfpfeiler
- UP_R = rechtsseitiger Uferpfeiler (südliches Brückenwiderlager).

Die Zahlenwerte in der Tabelle bedeuten die Bewegungen in Koordinatenachsenrichtung in mm, die Indexe O und U bezeichnen die »oberen« bzw. »unteren« Kontrollpunktmarken.

4.2 Vertikalbewegungen

Zweck der Höhenmessungen an dem Brückenunterbau war, die in der Höhenlage der Brückenwiderlager und Brückenpfeiler während der Untersuchung erfolgten Änderungen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Die Höhenmessungen sollten zwei Fragen beantworten:

a) Haben sich während der Deformationsmeßreihe an den Brückenwiderlagern und -pfeilern Höhenänderungen ständiger Richtung — Senkungen — gezeigt?

b) Können die Vertikalbewegungen je eines Pfeilers oder Brückenwiderlagers als gleich gelten, oder ist mit einer ungleichmäßigen Senkung, d. h. einem geringen Kippen des Unterbaues zu rechnen? Letzterer Umstand beeinflusst nämlich auch den statischen Kräfteverlauf im Oberbau, im Fachwerkträger.

Die aus den Meßergebnissen berechneten vertikalen Bewegungen wurden in mm tabellarisch zusammengestellt (Tafel 2). Das Vorzeichen Plus bedeutet bei den Vertikalbewegungen der Höhenmarken einen Aufstieg im Verhältnis zur ersten Messung als Grundmessung, das Vorzeichen Minus eine Senkung.

Aus der Tabelle ist zu erkennen, daß sich die Vertikalbewegungen der Höhenmarken (Punkte I, II, III, IV) auf dem Brückenwiderlager und dem Pfeiler am linken Ufer wesentlich von den Bewegungen der Höhenmarken am rechten Ufer (Punkte V, VI, VII, VIII) unterscheiden. Während sich die Höhenmarken am linken Ufer zwischen den Randwerten -1 und $+2$ mm bewegten, betragen die Bewegungen der Höhenmarken am rechten Ufer Werte zwischen -6 und ± 0 mm. Die Vertikalbewegungen der Höhenmarken am rechten Ufer sowie deren Tendenz und Perioden deuten auf einen Zusammenhang mit dem wechselnden Wasserstand des Mosoner Donauarms (Abb. 3), was mit Erfahrungen früherer Untersuchungen [12] übereinstimmt. Die Brückenbauten am linken Ufer weisen hingegen kaum vertikale Bewegungen auf, und kein ähnlicher Zusammenhang mit dem Wasserstand ist nachzuweisen.

Tafel 1

Messung	UP _{Lo}		UP _{Lu}		SP _{Lo}		SP _{Lu}		SP _{Ro}		SP _{Ru}		UP _{Ro}		UP _{Ru}	
	Δy	Δx														
1.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	-1	+1	-1	+2	0	-2	+1	-1	+1	+2	+1	+1	+2	+3	+3	+3
3.	-3	+2	-3	+2	-2	0	-1	+1	-1	+3	-1	+2	+1	+5	+1	+4
4.	-1	+2	-2	+3	+2	0	+1	0	-1	-1	-1	-2	0	-5	0	-4
5.	-3	+2	-2	+3	+1	+2	+2	+3	-2	+2	-1	+1	+1	+1	+1	+1
6.	-2	+2	-2	+2	0	+1	+1	+2	-2	0	-2	-1	0	-1	0	0
7.	0	+1	0	0	+1	-1	+2	-1	-2	-2	-3	-3	0	-2	-1	-2
8.	-2	0	-2	+1	0	0	0	+1	+1	-1	0	-2	+2	0	+1	-1
9.	-3	+2	-3	+3	-2	0	-1	+1	-1	+2	0	+2	0	+2	0	+3
10.	+1	-1	0	-2	+1	-2	+2	-3	+1	-1	+1	0	0	0	+1	+1
11.	-2	+2	-3	+2	-3	-2	-2	-1	-3	+1	-2	+1	-1	-1	-1	0
12.	-1	0	0	0	+1	0	0	-1	-2	-1	-1	-2	0	+2	-1	+2

Tafel 2

Messung		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1.	18. 08. 1977	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	28. 09. 1977	+1	0	+1	+1	-3	-5	-4	-6
3.	26. 10. 1977	+1	0	0	+1	-2	-2	-2	-2
4.	28. 11. 1977	+1	+1	+1	+1	-4	-4	-4	-5
5.	28. 12. 1977	0	0	0	+1	-2	-2	-2	-3
6.	02. 02. 1978	+2	0	0	+2	-3	-3	-2	-3
7.	28. 02. 1978	0	-1	+1	+1	-3	-3	-3	-4
8.	29. 03. 1978	+2	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
9.	04. 05. 1978	+1	0	0	+1	-2	-2	-2	-2
10.	24. 05. 1978	0	0	0	0	0	-1	0	-1
11.	29. 06. 1978	+1	0	+1	+1	-3	-3	-3	-3
12.	22. 09. 1978	0	0	0	+1	-3	-3	-2	-4

Mit dem Mittelwert aus den Höhenänderungen der Höhenmarken V bis VIII und durch die zahlenmäßige Ermittlung des Zusammenhanges mit den Wasserständen wurde eine stochastische Prüfung nach der *Spearman*schen Rangkorrelationsmethode durchgeführt [14].

Der erhaltene Korrelationskoeffizient

$$r = 0,71$$

zeigt, daß zwischen den beiden Erscheinungen eine ziemlich »straffe« Korrelation besteht. Die den stochastischen Zusammenhang ausdrückende Korrelationsgleichung lautet:

$$P = +0,0143 V - 5,15 .$$

Dabei bedeuten P den Mittelwert der Höhenänderungen der Höhenmarken V bis VIII, im Verhältnis zu ihrer Lage bei der Bezugsmessung in mm; V den vorliegenden Wasserstand in cm.

Zu den unterschiedlichen Bewegungen der am linken und am rechten Ufer im Brückenunterbau angeordneten Höhenmarken ist zu bemerken, daß Höhe, Bauart und Baustoffe der Ufermauern an den beiden Ufern, die Tiefe der für die Entwässerung eingesetzten Spundwände usw. verschieden sind. Auf diese Frage wird hier nicht näher eingegangen.

Zusammenfassung

Die Deformationsmessungen an Brücken sowie anderen Industrie- und Verkehrsanlagen stellen hohe Genauigkeitsanforderungen an die Messungen der industriellen Geodäsie. In der Arbeit werden die Deformationsmessungen an einer 126 m langen Donaubrücke beschrieben, die Ausarbeitung einer den Genauigkeitsforderungen genügenden Meßmethode, die Durchführung und Verarbeitung der Deformationsmessungen sowie die Auswertung der Ergebnisse werden behandelt. Obwohl bei der periodischen statischen Prüfung wesentliche horizontale und vertikale Bewegungen des Oberbaues und der Fahrbahnplatten beobachtet wurden, bestätigten die geodätischen Präzisionsmessungen von 14 Monaten, daß der Brückenunterbau sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung lediglich Bewegungen von Millimeter-Größenordnung, größtenteils elastischer Art unterliegt, die den Erhaltungszustand der Brücke nicht gefährden.

Die zur Bestimmung der Bewegungen durchgeführten Präzisionsmessungen tragen wesentlich zu dem Schutz des Erhaltungszustands der Brücke und zur Sicherstellung des bestimmungsmäßigen Verkehrs auf derselben bei. Somit leistet die industrielle Geodäsie mehreren Industriezweigen — im vorliegenden Falle der Brückeninstandhaltung und dem Brückenbau — eine wichtige Hilfe.

Schrifttum

1. BÁNHEGYI, I.—DETRÉKŐI, Á.—ÓDOR, K.: Deformationsmessungen an den Auflagern einer Theißbrücke. *Periodica Polytechnica. Civ. Eng.* Vol. 19. No. 1—2. Bp. 1975.
2. BEKE, J.: Straßenbrücke über d. Donau-Arm in Győr. *Bauingenieur*. 1930.
3. GYÖRKE, Z.: Deformationsmessungen an dem Wasserkraft- und Stauwerk bei Tiszalök.* *Geod. és Kart.* 1964.
4. HOMORÓDI, L.: Geodätische Bestimmung der Bewegungen und Deformationen großer Bauwerke.* *Geod. és Kart.* 1958.
5. HORVÁTH, K.: Geodätische Arbeiten bei dem Wiederaufbau der Ujpester Donau-Eisenbahnbrücke.* *ÉKME Tud. Közl.* 1958.
6. HORVÁTH, K.—L'AUNÉ, O.: Stochastische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Wasserstandschwankungen und Wandbewegungen.* *ÉKME Tud. Közl.* 1958.
7. HORVÁTH, K.: Festpunktnetz für die Kraftstufe Kisköre.* *Geod. és Kart.* 1969.
8. HORVÁTH, K.: Deformationsmessungen an der Brücke über den Ráckeveer Donauarm.* *Geod. és Kart.* 1973.
9. L'AUNÉ, O.: Statistische Komparation.* *Geod. és Kart.* 1963.
10. L'AUNÉ, O.: Ein neues Berechnungsverfahren für die Prüfung von Horizontalbewegungen. *Per. Pol. C. E.* Vol. 19. (1975), No. 1—2.
11. MIHALICH, Gy.: Geschichte des ungarischen Brückenbaues im XIX. und XX. Jahrhundert.* *Bp. Akadémiai K.* 1960.
12. MISKOLCZI, L.: Höhendeformationsmessungen an Brückenpfeilern.* *Geod. és Kart.* 1976.
13. ÓDOR, K.: Genauigkeitsfragen des ingenieurgeodätischen horizontalen Festpunktnetzes.* *Geod. és Kart.* 1969.
14. THEISS, E.: Korrelations- und Trendrechnung.* Budapest, 1958.

Dozent Dr. Kálmán HORVÁTH, H-1521 Budapest

* In ungarischer Sprache