

Paper-ID: VGI_199122



Talkonvergenzmessungen im Stauraum und Vorland der Talsperre Zillergründl

H. Wackenreuther ¹

¹ *Tauernkraftwerke AG, Abt. TP-Vermessung, A-5710 Kaprun*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **79** (4), S. 289–297

1991

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Wackenreuther_VGI_199122,  
Title = {Talkonvergenzmessungen im Stauraum und Vorland der Talsperre Zillergr  
        {"\u}ndl},  
Author = {Wackenreuther, H.},  
Journal = {{{"0}sterreichische Zeitschrift f{"\u}r Vermessungswesen und  
          Photogrammetrie},  
Pages = {289--297},  
Number = {4},  
Year = {1991},  
Volume = {79}  
}
```



Talkonvergenzmessungen im Stauraum und Vorland der Talsperre Zillergründl

von H. Wackenreuther, Kaprun und Tauernkraftwerke AG, Abt. TP-Vermessung

Einleitung und Aufgabenstellung:

Die Bogensperre Zillergründl liegt auf ca. 1800 m Seehöhe im Zentralgneiskomplex der Zillertaler Alpen. Sie wurde als Jahresspeicher zum Zwecke der Stromerzeugung aus Wasserkraft von 1982 bis 1985 betoniert und erreichte 1990 erstmals den Vollstau. Mit einer Mauerhöhe von 186 m und einer Kronenlänge von 506 m gilt sie als zweitgrößte Bogensperre Österreichs.

Sowohl für Statiker als auch für Felsmechaniker war es von Interesse, ob die Wassermassen von $88,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ bei Vollstau eine meßbare Talaufweitung verursachen können. Aus diesem Grund wurden sowohl im Stauraum als auch im Sperrenvorland Divergenz-Konvergenz-Meßstrecken eingerichtet.

Aus der Auswertung dieser Meßstrecken lassen sich nicht nur Aussagen über die Talaufweitung treffen, sondern auch über die in der geodätischen Praxis erreichbaren Genauigkeiten mit elektrooptischen Distanzmeßgeräten entlang meteorologisch schwer zu erfassender Profile.

Meßanordnung: (siehe Abb. 1)

Insgesamt wurden 6 Meßstrecken in den Jahren 1983—1985 eingerichtet, wobei die Strecken D—E und A—B im Stauraum liegen, C—H oberhalb der Sperrenwiderlager verläuft, I—J und I—II im von der Sperre beeinflussten Vorland liegen und F—G im von der Sperre vermutlich unbeeinflussten Sperrenvorland liegt.

Als Meßmethode wurde die direkte Streckenmessung mittels elektrooptischer Präzisionsdistanzer (EDM) gewählt. Von 1983—1985 wurde mit einem Kern-Mekometer ME 3000 gemessen. Nach einem Defekt mußte das Me 3000 ausgetauscht werden, und so kam ab 1989 ein Wild DI 2000 zum Einsatz.

Es ist klar, daß die vorliegende Meßanordnung ein geodätisch singuläres (unterbestimmtes) Netz darstellt. Das bedeutet, daß sich daraus weder Koordinaten noch Verschiebungsvektoren hypothesenfrei ableiten lassen. Auch grobe Meßfehler können wegen der geringen Zuverlässigkeit der Streckenmessung nicht sofort, sondern bestenfalls nach Vorliegen einer Meßreihe erkannt werden. Aus diesem Grund wurden alle Meßpfeiler im Jahr 1985 vor Beginn des ersten Teilstaus als überbestimmtes Netz durchgemessen und in das Sperrendeformationssystem miteinbezogen. Zur Lagebestimmung im vorliegenden Netz ist folgendes zu sagen:

- Es wurden **alle meßbaren Richtungen in 4 Sätzen mit Sekundentheodolit gemessen**.
- **Es wurden alle** meßbaren Strecken 6mal hin und zurück gemessen.
- Die Punktlagefehler der ausgeglichenen Pfeiler, bezogen auf die als „fix“ angenommenen Basispunkte F und G, betragen zwischen 0,4 und 1,0 mm.
- Die relativen Fehler der ausgeglichenen Strecken sind durchwegs kleiner als $\pm 0,5 \text{ mm}$.
- Das Netz selbst ist etwa 3fach überstimmt.

Durch Wiederholung dieser Netzmessung können gegebenenfalls unplausible Streckenänderungen bzw. Pfeilerbewegungen analysiert werden.

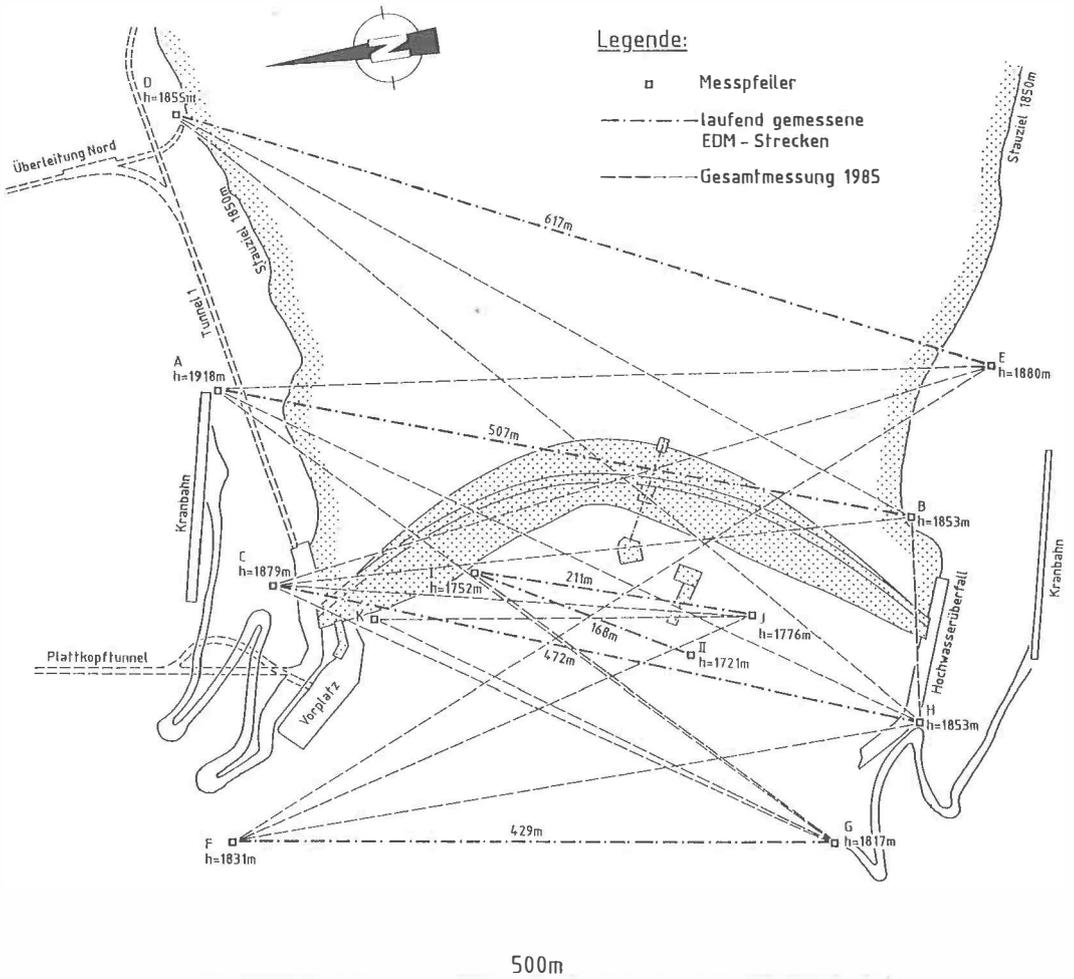


Abb. 1: Meßübersicht der Konvergenzmeßstrecken mit Gesamtmessung 1985

Zur Durchführung routinemäßiger Folgemessungen entschieden wird uns in erster Linie aus wirtschaftlichen Überlegungen für die direkte und ausschließliche Messung der gesuchten Strecken. Der Aufwand für eine gesamte Netzvermessung wäre nämlich 10mal so hoch.

Eichung:

Bei der gewählten Meßanordnung ist besonderes Augenmerk auf die Eichung der EDM-Geräte zu legen. Davon sind sowohl ME 3000 als auch DI 2000 betroffen. Es kamen folgende Methoden zur Anwendung:

- Jährliche Eichung des ME 3000 durch die Herstellerfirma Aarau.
- Alle 2 Jahre interne Eichung durch Streckenmessung in allen Kombinationen auf Pfeilerreihen an der HTBL Saalfelden bzw. an der TU Graz.
- Vergleichsmessungen zwischen DI 2000 und einem Mekometer ME 5000.

Diese Messungen bestätigten durchwegs die von den Herstellerfirmen angegebenen Genauigkeiten.

Zusätzlich wurde in jeder Meßepoche die als „fix“ angenommene Basisstrecke F—G mitbeobachtet, worauf in Kapitel „Auswertung und Interpretation“ noch näher eingegangen wird.

Erfassung der Atmosphäre und Meßablauf:

Die Entfernungsmessung wurde auf jedem Standpunkt 6mal ausgelöst und gemittelt. Eine mittlere Atmosphäre wurde aus Messungen in beiden Endpunkten (1,6 m über Boden, beschattet) errechnet. Da der Meßstrahl abwechselnd über Latschen, Fels, Beton, Wasser, Schnee oder in der freien Atmosphäre verläuft, ist der so gewonnene Wert sicherlich nicht repräsentativ für die gesamte Strecke. Um bessere atmosphärische Werte zu erhalten, wurden alle Strecken sowohl hin als auch zurück gemessen. Dabei wurde für die Hinmessung nach Möglichkeit der Vormittag (atmosphärische Erwärmung) und für die Rückmessung der späte Nachmittag (atmosphärische Abkühlung) gewählt. Auf Nachtmessungen bzw. Atmosphärenerfassung mit Ballonsonden wurde verzichtet.

Auswertung und Interpretation:

Zunächst seien die atmosphärisch korrigierten Strecken aus Hin- und Rückmessung verglichen. Diese Differenzen aus Hin- und Rückmessung sind speziell bei den ME-3000-Messungen erstaunlich groß und betragen etwa $\pm 2,3$ mm. Laut Werksangabe und Eichmessungen müßten sie jedoch bei ± 1 mm liegen.

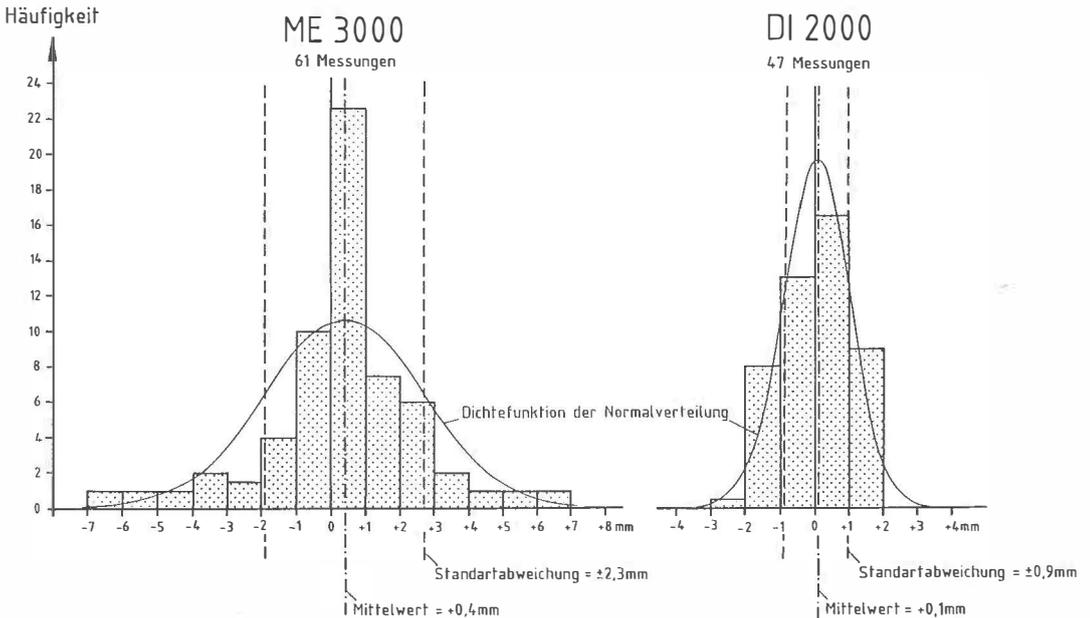


Abb. 2: Verteilung der Differenzen aus Hin- minus Rückmessung von ME-3000- und DI-2000-Strecken

Aus Abb. 2 fällt vor allem das Überwiegen der positiven Differenzen bei den ME-3000-Messungen auf, was bedeutet, daß die Vormittagsstrecken um durchschnittlich 0,4 mm länger gemessen werden als die Nachmittagsstrecken. Die großen Differenzen und die systematische Verschiebung des Mittelwertes könnten ihre Ursache in ungenügender Erfassung der Atmosphäre haben. Eine um 1°C veränderte Lufttemperatur würde beispielsweise das Streckenresultat bereits um ca. 0,5 mm verfälschen. Interessanterweise zeigen die ab 1989 durchgeführten DI-2000-Messungen weder so große Streuungen noch eine systematische Verschiebung des Mittels. Die mittleren Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung streuen $\pm 0,9$ mm um den Nullpunkt und liegen somit innerhalb der vom Erzeuger angegebenen Genauigkeit. Die Ursache der scheinbar besseren DI-2000-Werte könnten im rascheren Meßablauf und den daraus resultierenden geringeren Zeitdifferenzen zwischen Hin- und Rückmessung zu suchen sein, sie könnten aber auch in der Funktionsweise des ME 3000 liegen. Unter Umständen liegen Angleichungsprobleme des Hohlraumresonators vor. Aus dem vorhandenen Datenmaterial kann jedenfalls keine Erklärung abgeleitet werden.

Weit interessanter als die Frage nach den Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung ist die Frage nach der Genauigkeit des Mittels. Diese soll hier anhand der als fix angenommenen Strecke F—G untersucht werden:

Die Annahme der Stabilität von F—G hat sich bis jetzt aus folgenden Gründen als plausibel erwiesen:

- F und G dienen auch als Fixpunkte im Sperrendeformationsnetz. Die Meßergebnisse zu den ebenfalls fixen Fernzielen und Nahversicherungspunkten waren bis jetzt spannungsfrei, die Lagekoordinaten der davon abgeleiteten Pfeiler waren plausibel.

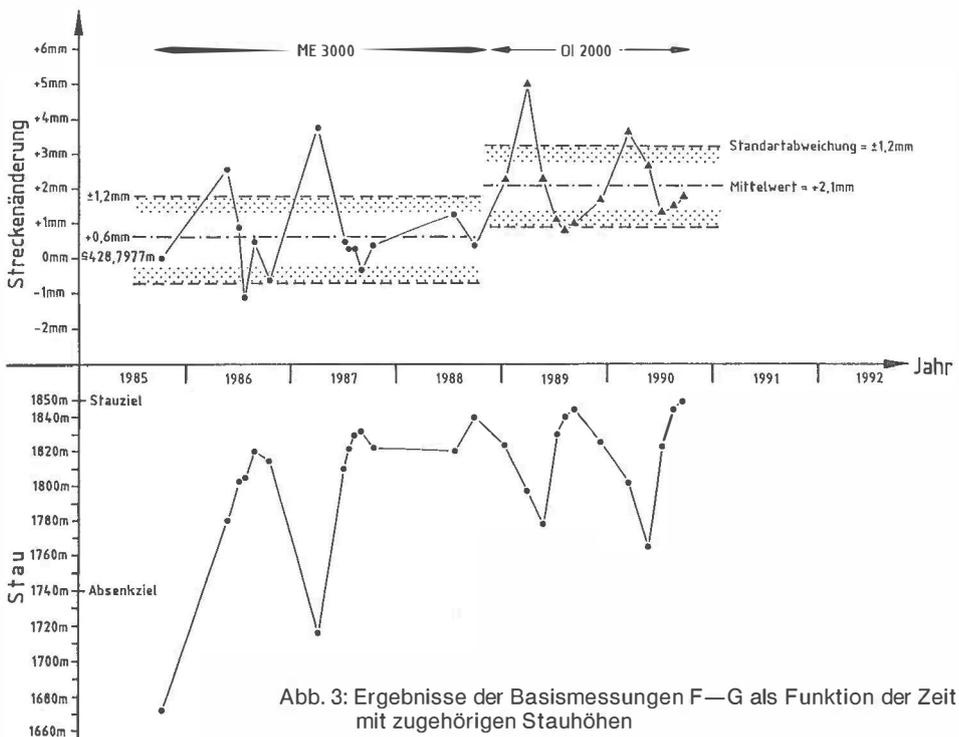


Abb. 3: Ergebnisse der Basismessungen F—G als Funktion der Zeit mit zugehörigen Stauhöhen

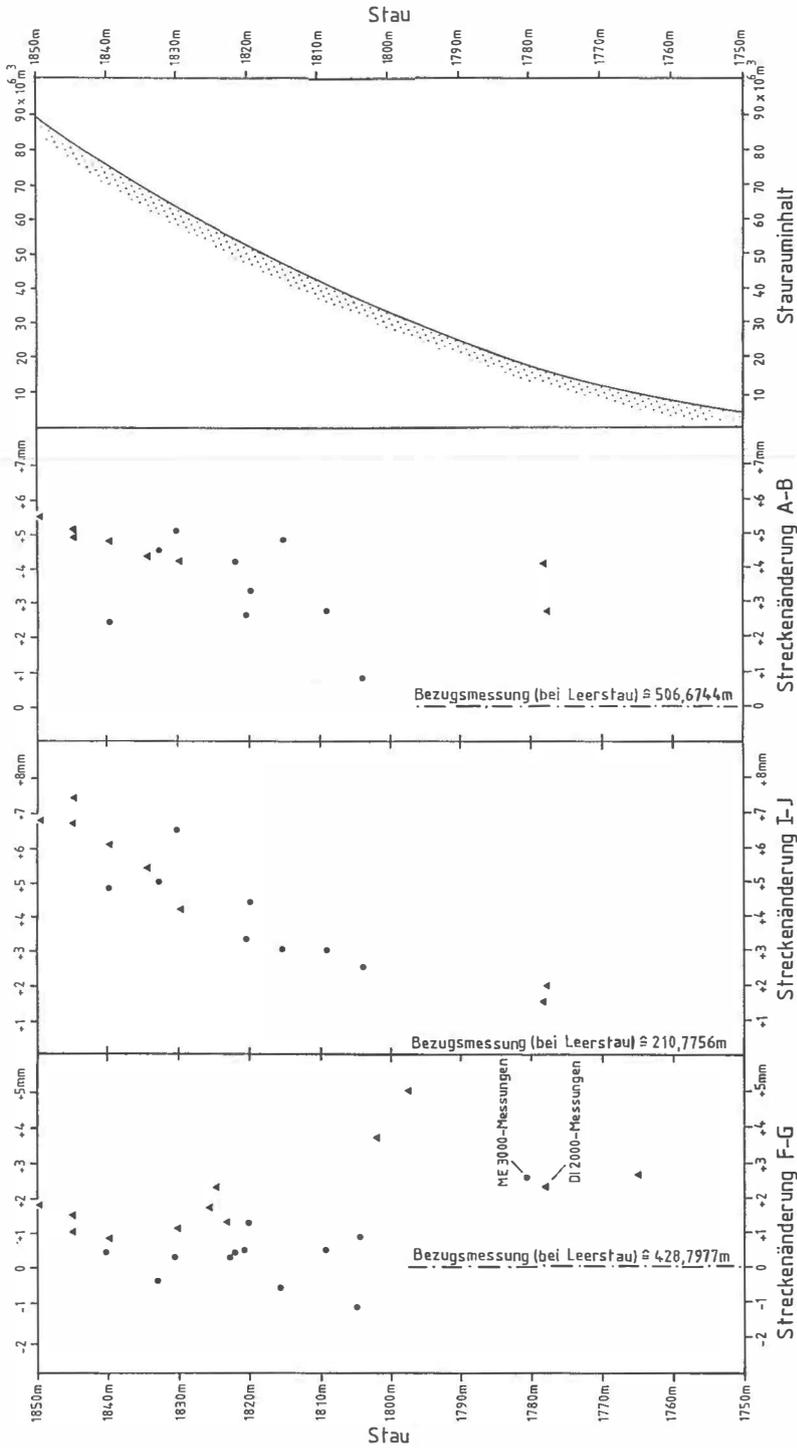


Abb. 4: Darstellung der Strecken F—G, I—J und A—B (atmosphärisch reduziert und gemittelt) in Abhängigkeit vom Stau

- Die Maßstabsunbekannten, die sich aus der Ausgleichung der Distanzen des Sperrendeformationsnetzes ergaben (EDM bzw. Invardraht), haben sich bis jetzt nicht signifikant von 1 unterschieden.

Bei Vorliegen von normalverteilten Stichproben müßten die Mittel aus Hin- und Rückmessung nur etwa die halbe Streuung aufweisen wie die Differenzen aus Hin- und Rückmessung.

Wie aus Abb. 3 zu erkennen ist, ist dies auch bei den ME-3000-Messungen der Fall. Bei den DI-2000-Messungen ist die Streuung zwar gleich groß wie bei den Mekometermessungen, jedoch größer als die Streuung der Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung. Hier liegt der klassische Fall vor, daß große innere Genauigkeiten ein besseres Ergebnis vortäuschen als tatsächlich erreichbar sind.

Es kann festgehalten werden, daß die Streckenergebnisse F—G um $\pm 1,2$ mm streuen. Eine leichte Tendenz zur Streckenverlängerung der DI-2000-Messungen gegenüber den ME-3000-Messungen liegt vor.

Zu Abb. 4 ist folgendes anzumerken:

- Parallel zu den Streckenergebnissen ist die Speicherinhaltskurve dargestellt. Diese läßt vermuten, daß die Hauptbeeinflussung durch den Stau erst bei relativ hohem Wasserstand zu erwarten ist, da einerseits die Strecken im Stauraum durchwegs oberhalb des Stauziels von 1850 m verlaufen und andererseits der Speicherinhalt bei einem Stau von 1810 m erst ca. 50% des Gesamtinhaltes beträgt.
- Die Strecke F—G zeigt keine Stauabhängigkeit.
- Da die Strecke I—J und I—II ein ähnliches Verhalten zeigen, ist in Abb. 4 nur I—J dargestellt und steht stellvertretend für I—II. Es ist deutlich eine reversible Talaufweitung von ca. 5 mm zwischen Stau 1770 und 1850 erkennbar. Diese Talauftreibung resultiert offenbar daraus, daß zumindest Pfeiler I im Einflußbereich des Sperrenwiderlagers fundiert ist.
- Die Strecken A—B, D—E und C—H weisen ebenfalls ein ähnliches Verhalten auf und werden in Abb. 4 durch A—B repräsentiert. Die Ergebnisse von A—B streuen wesentlich stärker als I—J, was auf die größere Streckenlänge und die schwieriger zu erfassende Atmosphäre von A—B zurückzuführen ist. I—J liegt nämlich größtenteils über dem Talsperrenschatten.

Eine Stauabhängigkeit ist bei A—B nicht eindeutig erkennbar. Sie ist aber einerseits mit Sicherheit wesentlich kleiner als bei I—J (falls überhaupt vorhanden) und wird andererseits von den erwähnten Streuungen überlagert.

Versuch der Einführung von Quasistrecken:

Um eventuelle Maßstabsfehler besser erfassen zu können, wird in der Literatur verschiedentlich vorgeschlagen, anstatt gemessener Strecken sogenannte „Quasistrecken“, das sind Streckenverhältnisse, einzuführen. Die Strecke F—G ist als stabil anzusehen, und das zeitliche Mittel ist bei allen Streckenmessungen, bedingt durch die Meßreihenfolge: D, A, C, F, I, II, J, G, H, B, E, etwa gleich. Aus diesem Grund liegt es auf der Hand, die Streckenrelationen zu F—G zu untersuchen.

Im günstigen Fall passiert folgendes: Die systematischen Fehleranteile überwiegen, und in F—G liegt eine Modellatmosphäre bzw. ein Modellmaßstab vor. In diesem Fall werden die systematischen Fehler eliminiert und die Resultate werden besser.

Im ungünstigen Fall überwiegen die zufälligen oder quasi zufälligen Fehler. Diese addieren sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz, wodurch sich die Resultate verschlechtern.

Die Untersuchungen wurden mit allen Strecken durchgeführt. Da die Ergebnisse bei allen Strecken ähnlich waren, sei hier nur das Resultat von I—J und A—B dargestellt:

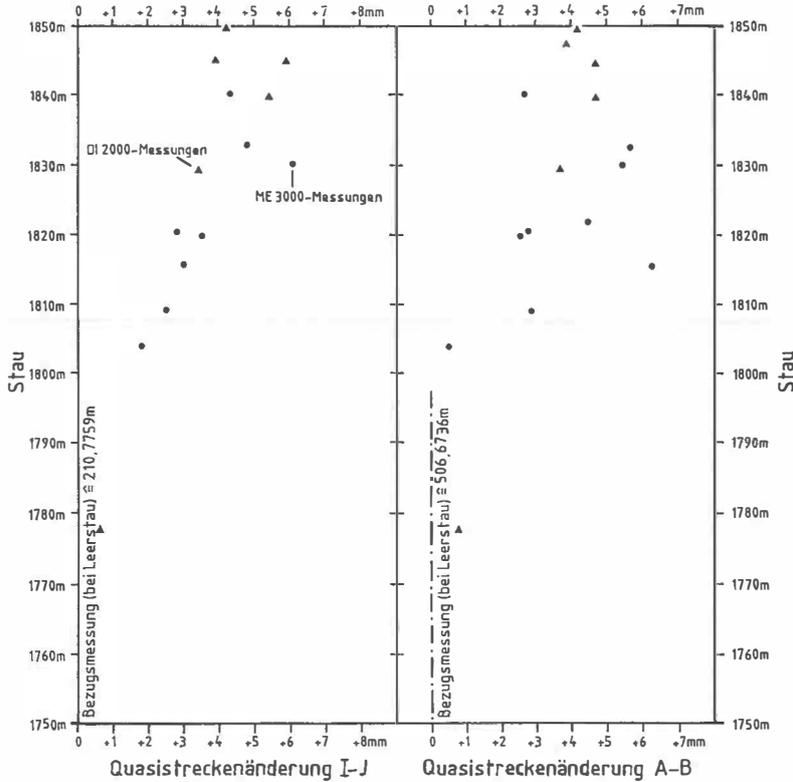


Abb. 5: Darstellung der korrigierten Strecke I—J und A—B in Abhängigkeit vom Stau

Die korrigierten Strecken (Quasistrecken) errechnen sich am Beispiel von A—B auf folgende Weise:

$$S_{K(A, B)} = S_{G(A, B)} \cdot \frac{S_{B(F, G)}}{S_{G(F, G)}}$$

- $S_{K(A, B)}$... korrigierte Strecke A—B der jeweiligen Meßperiode
- $S_{G(A, B)}$... gemessene Strecke A—B der jeweiligen Meßperiode
- $S_{G(F, G)}$... gemessene Strecke F—G der jeweiligen Meßperiode
- $S_{B(F, G)}$... gemessene Strecke F—G der Bezugsmessung

Im Vergleich von Abb. 5 mit Abb. 4 ist keine Resultatsverbesserung erkennbar. Es dürften zwar bei allen Strecken systematische Fehler vorliegen, diese halten sich aber mit den zufälligen Fehlern die Waage. Ähnliches wird auch durch Abb. 6 verdeutlicht, wo die Strecken F—G mit A—B zueinander dargestellt werden und sich keine signifikante Korrelation ablesen läßt, sondern sich eher eine zufällige Punktwolke ergibt.

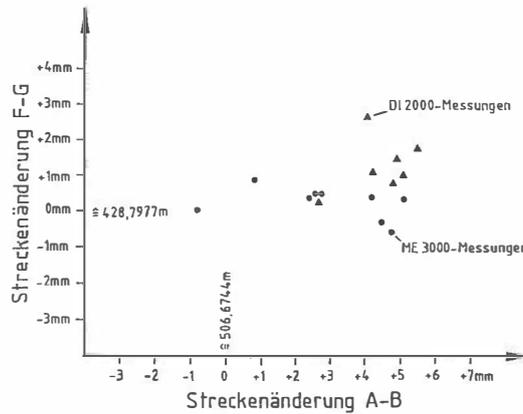


Abb. 6: Darstellung der Strecke A—B und F—G zueinander (atmosphärisch reduziert und gemittelt)

Verbesserungsvorschläge und Ausblick:

Um die Genauigkeit derart zu erhöhen, daß der Millimeter garantiert werden kann, müßten die mittleren Meßfehler in Submillimeterbereich bei etwa $\pm 0,3$ mm liegen. Um dies zu erreichen, werden folgende Vorgangsweisen vorgeschlagen:

- Bessere Erfassung der Atmosphäre mittels Ballonsonden.
- Streckenmessungen über einen 24-Stunden-Zyklus.
- Zusätzliche Triangulierung bzw. Trilaterierung.
- Verlängerung der Meßstrecken bis in temperaturkonstante Felstiefen, mittels Stangenextensometern.
- Nahversicherungspunkte und Kippungsmessungen bei den Pfeilern.
- Verwendung genauerer Streckenmeßgeräte wie Mekometer ME 5000 oder Verwendung hochpräziser Dispersionsmeßgeräte. Dispersionsmeßgeräte besitzen 2 Laser mit unterschiedlicher Trägerwellenlänge. Bei einer inneren Genauigkeit im Bereich von ca. 0,02 mm könnte somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen hinlänglich genau bestimmt werden. Eine genaue Erfassung der atmosphärischen Werte wäre nicht mehr nötig. Leider sind solche Geräte mit praxisnaher Bedienbarkeit und zu erschwinglichen Preisen noch nicht am Markt.

Zusammenfassung

Mit der Methode der direkten Streckenmessung mit ME 3000 bzw. DI 2000 konnten Konvergenzstrecken im Umfeld der Sperre Zillergründl mit Genauigkeiten zwischen ± 1 mm und ± 2 mm ermittelt werden. Stauabhängige Streckenverlängerungen von ca. 5 mm konnten nur bei den Vorlandstrecken nahe der Talsperre nachgewiesen werden. Diese werden jedoch vermutlich nicht vom Wasserdruck sondern den Sperrwiderlagerkräften von bis zu 11.000 t/m² verursacht. Eventuelle staubedingte Tal aufweitungen im Rückstauraum liegen innerhalb der Meßgenauigkeit. Sie wären aber so gering, daß sie auf das Verhalten der Talsperre sicherlich nur untergeordnete Bedeutung hätten.

Die Einführung von Streckenverhältnissen brachte nicht die erhoffte Verbesserung der Genauigkeit.

Eine Steigerung der Meßgenauigkeit ist möglich, da wir uns aber an die Grenzbereiche der erreichbaren Genauigkeit herantasten, würde der Aufwand dafür sehr groß sein.

Abschließend sei noch allen Mitarbeitern gedankt, die unter oft widrigen Umständen am Zustandekommen der Resultate mitgewirkt haben. Die Messungen werden in den nächsten Jahren in ähnlicher Weise fortgesetzt werden.

Literatur

- Aeschlimann, H.:* Zur Genauigkeit von Invardraht- und Mekometermessungen zur Berechnung von geodätisch bestimmten Verschiebungen. Vortrag am VI. Internationalen Kurs für Ingenieurmessung hoher Präzision; Graz 1970.
- Hernandez, E. N., Hugget, G. R.:* Two Color Terrameter—Its Application and Accuracy; Technical Papers, The American Congress on Surveying and Mapping; Washington 1981.
- Keller, W.:* Geodätische Deformationsmessungen an Staumauern, Kern u. Co. AG + Ingenieurbüro Walter Schneider AG.
- Kuntz, E., Meier-Hirmer, B., Seckel, H.:* Deformationsmessungen an einem Speicherbecken mit dem Mekometer ME 3000; Karlsruhe.
- Meier, D., Loser, R.:* Das Mekometer ME 5000 — Ein neuer Präzisionsdistanzmesser, Aarau, Sonderdruck AVN 1986.
- Niemeier, W., Wunderlich, T.:* Geodetic Monitoring of Dams—A Comparison of various concepts; Hannover 1989.
- Peters, K.:* Entfernungsmessung mit Wellen; Vorlesungsmanuskript TU Wien 1976/77.
- Schlegel, G.:* Geodätische Probleme beim Bau des Zillerkraftwerkes; Vortrag beim Geodätischen Kolloquium 1986 in Aachen.
- Static and Dynamic Behavior of Kubore Dam.
Tauernkraftwerke AG: Vertrauen in die Kraft des Wassers; Verlag: A. F. Koska — Wien 1987.
Manuskript eingelangt im April 1991.