

Mathematisch-statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung

Von Volker Bettzieche

Für die Überwachung der Sicherheit einer Talsperre ist die Auswertung der Messwerte von wesentlicher Bedeutung. Eine zeitnahe Betrachtung ermöglicht es, kurzfristige gravierende Änderungen im Verhalten eines Absperrbauwerkes zu erkennen und darauf zu reagieren. Langfristige Veränderungen können jedoch nur erkannt werden, wenn weitergehende Analysen der Messwerte durchgeführt werden. Hierzu wird die Durchführung von mathematisch-statistischen Analysen vorgeschlagen und die erfolgreiche Anwendung am Beispiel der Fürwiggestaumauer vorgestellt.

1 Einführung

Die messtechnische Überwachung der Talsperren ist eine der wichtigsten Aufgaben eines Talsperrenbetreibers. Eine moderne EDV unterstützt an vielen Anlagen diese Aufgaben der Datenerhebung durch elektronische Messgeber, Datenlogger und grafische Darstellung der Messdaten an einem PC. Die aktuelle Auswertung und Interpretation der Messwerte und damit des Bauwerkverhaltens ist so für den Talsperrenmeister leicht möglich.

Diese Sofortauswertung kann jedoch nur ein erster Schritt bei der messtechnischen

Überwachung eines Absperrbauwerkes sein. Weitere Auswertungen der Daten unter Hinzuziehung zusätzlicher Aspekte sind im Sinne einer langfristigen Überwachung notwendig.

Zur Identifikation von langfristigen Entwicklungen des Absperrbauwerkes schlägt das ATV/DVWK-Merkblatt 222/1991 „Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen“ [1] vor:

Die Messmethoden, die Messgeräte, die Messgenauigkeit und das Auswerteverfahren sind in Abhängigkeit von den zu er-

wartenden Messgrößen zu wählen. Bei der Auswertung kann auch eine mathematisch-statistische Analyse erforderlich werden.

2 Mathematisch-statistische Analyse

Eine mathematisch-statistische Analyse der Messwerte basiert auf den Kontrollmessungen und Beobachtungen, wie sie jeder Talsperrenbetreiber durchzuführen hat. Im Gegensatz zu den jährlichen Betrachtungen des Sicherheitsberichtes betrachtet die mathematisch-statistische Analyse Messdaten über einen Zeitraum von z. B. 10 Jahren im Sinne der „Vertieften Überprüfung“ nach ATV/DVWK-Merkblatt 231 [2].

Über die Betrachtung von einzelnen Messwerten hinaus sollen

- langfristige Änderungen im Bauwerksverhalten sowie
- Ursachen und Wirkgrößen, welche die beobachteten Messgrößen beeinflussen, erkannt und quantifiziert werden.

Dieses Ziel sei an einem Beispiel erläutert: Bei der grafischen Darstellung der Verschiebungen der Krone einer Staumauer während eines Beobachtungszeitraumes ist es üblich, im gleichen Diagramm den Stauspiegel und den Verlauf der Lufttemperatur darzustellen (s. Bild 1). Der visuell durchgeführte Vergleich der Kurven zeigt, dass die Mauerverschiebungen durch die wechselnde Temperatur beeinflusst werden, da die

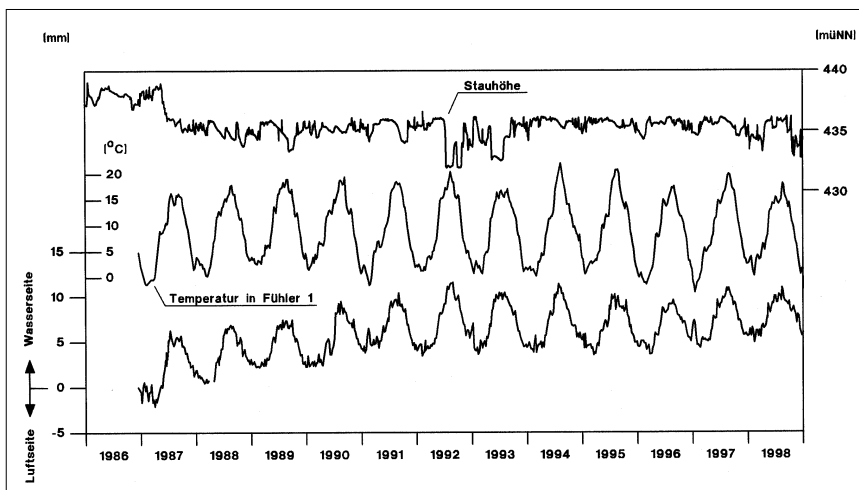


Bild 1: Radiale Verschiebungen der Mauerkrone einer Staumauer

Sonderdruck

Tabelle 1: Werte der Messungen (Lote: +: luftseitig / -: wasserseitig)

Messbereich		Anzahl Messwerte	Minimalwert	Mittelwert	Maximalwert
Stauhöhe	m ü. NN	516	431,95	435,13	438,13
Lufttemperatur	°C	516	-11,0	9,9	28,8
Schwimmlot	mm	516	243,88	246,31	248,62
Gewichtsloot	mm	516	235,94	239,99	243,28
Summe (Kronenverschiebung)	mm	516	-10,86	-6,32	-2,64

Tabelle 2: Multiple Regression der Größen der radialen Lotmessung (+: luftseitig / -: wasserseitig)

Verschiebungen radial	Steigungsmaß (Regressionskoeffizient) gegenüber			
	Stauhöhe mm pro m ü. NN	Lufttemperatur mm pro °C	Zeit mm pro Jahr	Bestimmtheitsmaß
Schwimmlot	0,157	-0,014	0,052	19%
Gewichtsloot	0,444	-0,200	-0,158	63%
Summe	0,601	-0,214	-0,106	58%

Stauhöhe kaum variiert. Eine häufige Formulierung in den Sicherheitsberichten lautet dann „Die ... Messungen zeigen ... elastische Verformungen, die ... auf Temperatureinflüsse zurückzuführen sind“.

Solche zunächst nur qualitativ möglichen Beurteilungen werden durch eine vertiefte Überprüfung der Messergebnisse quantifizierbar, wenn sie sich auf eine mathematisch-statistische Analyse gründet. Erst hierdurch können die Ergebnisse nachvollziehbar interpretiert und bewertet werden.

3 Ein Überblick über die statistischen Grundlagen

3.1 Einsatz der „multiplen Regression“ zur Erstellung eines Trendmodells

Der Zusammenhang zwischen Wirkgrößen und Messgrößen kann mit Hilfe der Statistik zahlenmäßig erfasst werden.

Ein wesentliches Verfahren der Trendbestimmung ist die Verwendung eines linearen Regressionsmodells. Hierbei werden die Wirkgrößen linear kombiniert, wobei die Koeffizienten so gewählt werden, dass sich eine möglichst gute Anpassung des Trendmodells an die beobachtete Messreihe ergibt.

Die Verwendung von linearen Trendmodellen ist erfahrungsgemäß gut zur Beschreibung geeignet, während in der entsprechenden Literatur insbesondere vor Trendextrapolationen (Prognosen) mittels höherwertiger polynominaler Funktionen gewarnt wird, da Polynome außerhalb

des Anpassungsbereiches rasch nach $\pm \infty$ gehen [6].

3.2 Test des Trendmodells

Zur ermittelten Regression sind vier Fragen zu klären:

1. Besteht ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten und den Ergebnissen des Regressionsmodells?
2. Ist dieser Zusammenhang systematisch oder nur „zufällig“?
3. Sind die einzelnen Wirkgrößen gleichwertig zu betrachten oder haben einzelne deutlichen Einfluss, während andere geringeren Einfluss haben?
4. Sind maßgebliche Wirkgrößen übersehen worden?

Diesen vier Fragen wird mit Hilfe der Varianzanalyse (s. z. B. [5]) nachgegangen. Hierbei werden diese Verfahren nur soweit eingesetzt, wie sinnvolle Ergebnisse er-

wartet werden. Wird zum Beispiel bereits die Frage nach dem Zusammenhang (Frage 1) nicht bestätigt, so erübrigen sich meist die weiteren Untersuchungen (Fragen 2 bis 4).

► Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß gibt an, ob zwischen zwei Zahlenreihen ein Zusammenhang besteht. Nimmt man als eine Zahlenreihe die gemessenen Werte, als zweite Reihe die aus der Regressionsberechnung ermittelten Werte, so kann für den Zusammenhang das Bestimmtheitsmaß ermittelt werden. Ein Maß nahe 1 zeigt an, dass ein Zusammenhang zwischen beiden besteht, ein Maß nahe 0 zeigt, dass kein Zusammenhang vorliegt, die Regression also verworfen werden muss.

Das Bestimmtheitsmaß zu einer mehrdimensionalen Regression entspricht dem Quadrat der Korrelation zweier Größen. Der Wertebereich liegt gleichfalls zwischen 0 und 1.

► F-Statistik

Die Qualität der ermittelten Anpassung kann mit Hilfe der Varianzanalyse bewertet werden. Sie prüft, ob die errechneten Werte näherungsweise an die Messwerte heranreichen, und zwar „verhältnismäßig“ genau.

Hierzu wird die Hypothese aufgestellt, dass zwischen den Wirkgrößen und der Messgröße eigentlich kein Zusammenhang besteht, sondern dass sie nur zufällig einen starken Zusammenhang zeigen. Um die Wahrscheinlichkeit zu beschreiben, mit der irrtümlich ein Zusammenhang ermittelt wird, wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit verwendet. Diese wird in den nachfolgenden Betrachtungen mit 5 % angesetzt. Ausgehend von einer F-Verteilung kann nun anhand der Anzahl der Wirkgrößen und der Messwerte der kritische F-Wert an-

Mathematical-Statistical Analysis of Measurements from Dam Monitoring

by Volker Bettzieche

For the monitoring of the safety of a dam the evaluation of the measured values is of substantial importance. A daily view of the data makes it possible to recognise serious changes in the behaviour of a dam directly and to react to it. Longterm changes however can be only recognised if extensive analyses of the measured values are carried out. For this the ATV/DVWK guideline 222/1991 recommends the execution of mathematical-statistical analyses. By the example of the masonry dam of the Fuerwigge Reservoir the successful application of these procedures are presented.

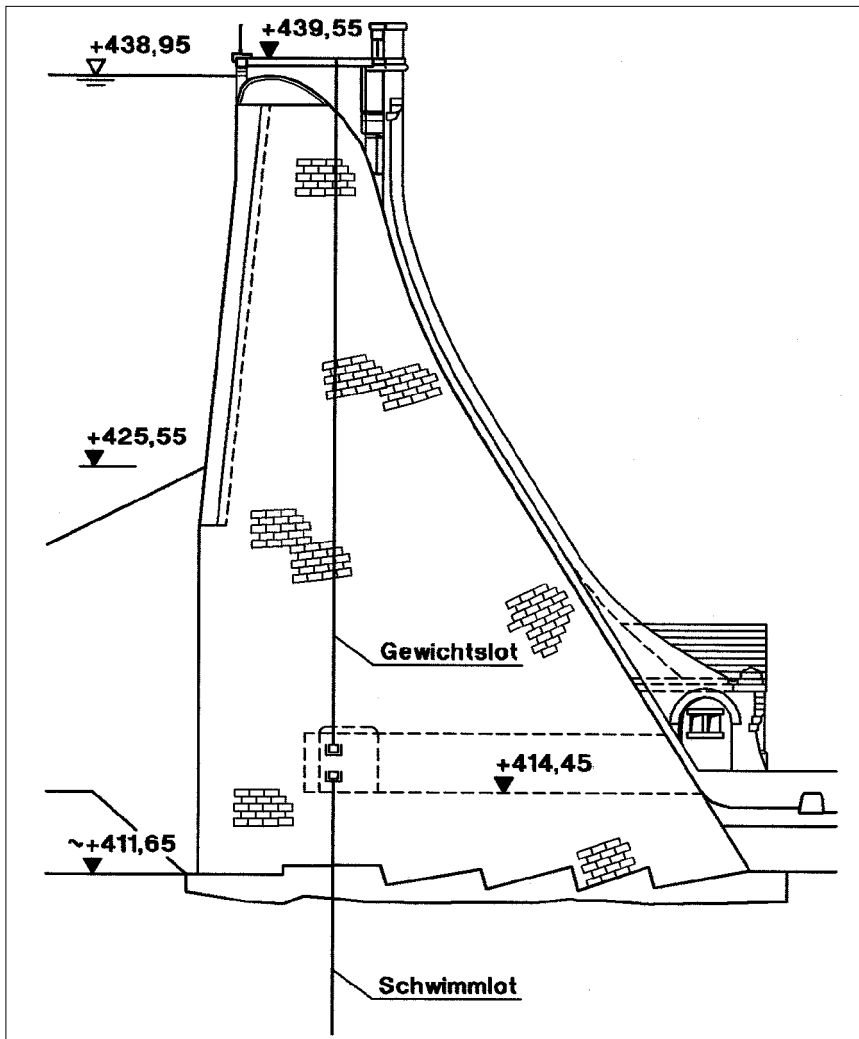


Bild 2: Fürwiggestaumauer

gegeben werden. Liegt der aus dem Regressionsmodell berechnete F-Wert über dem kritischen F-Wert, so kann von einem Zusammenhang zwischen den Wirkgrößen und der Messgröße ausgegangen werden.

► t-Verteilung von Student und Auswertung des Standardfehlers der Koeffizienten

Die Qualität der ermittelten Regressionskoeffizienten wird mit Hilfe der t-Verteilung analysiert. Diese Verteilung liefert anhand der Irrtumswahrscheinlichkeit, die auch hier zu 5% angenommen wird, einen kritischen t-Wert, der für alle Wirkgrößen gilt. Für jede Wirkgröße wird ein eigener t-Wert ermittelt. Liegt dieser über dem kritischen t-Wert, so ist der Regressionskoeffizient dieser Wirkgröße geeignet.

Eine weitere Auskunft zur Qualität des Regressionskoeffizienten ergibt sich, wenn man den Standardfehler des Koeffizienten

ermittelt und hiermit den 90%-Vertrauensbereich abschätzt. Der Abstand zwischen Untergrenze (5%-Fraktile) und Obergrenze (95%-Fraktile) des Vertrauensbereichs des Koeffizienten sowie die Werte in diesem Vertrauensbereich sollten physikalisch sinnvoll sein.

► Residuenanalyse mit Normalverteilung und Chi-Quadrat-Test

Bei der Gegenüberstellung der Messwerte mit den Ergebnissen der Regressionsberechnung ergeben sich nahezu immer Differenzen. Diese beruhen auf Zufälligkeiten, die selbst bei sorgfältigster Messung nicht auszuschließen sind. Durch die Differenzbildung zwischen Mess- und Regressionswerten erhält man die Residuen des Regressionsmodells. Diese „Reste“ müssen dann daraufhin untersucht werden, ob weitere systematische Einflüsse in ihnen enthalten sind. Für diese müsste dann eine weitere Wirkgröße im Regressionsmodell vorgesehen werden.

Sind keine wesentlichen Einflüsse übersehen worden, beruhen also die Residuen auf „reinem Zufall“, so müssen sie einer Normalverteilung entsprechen.

Zur Beschreibung der den Residuen zugrundeliegenden Normalverteilung werden Mittelwert und Standardabweichung der Residuen ermittelt.

Die Gegenüberstellung dieser Normalverteilung mit der tatsächlichen Verteilung der Residuen kann dann mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests beurteilt werden. Wird im Test eine ausreichende Signifikanz erreicht, so sind die Residuen normalverteilt und die maßgeblichen Wirkgrößen mit Hilfe der Regressionsberechnung ermittelt.

4 Mathematisch-statistische Analyse der Verformungen der Fürwiggestaumauer

Die in den Jahren 1902 bis 1904 errichtete, rd. 30 m hohe Bruchsteinmauer der Fürwiggetal Sperre gehört zu den ersten Talsperren, die nach Plänen von Prof. Intze im Einzugsgebiet der Ruhr errichtet wurden (s. Bild 2). Mit einer Stauoberfläche von 17,7 ha und einem Stauinhalt von 1,67 hm³ gehört sie nach heutigem Maßstab zu den kleinen Talsperren. Im Jahr 1986 wurde in der Staumauer eine Lotanlage, bestehend aus Gewichtslot und Schwimmloch, eingerichtet. Das Gewichtslot hängt in einer Bohrung, die von der Krone zu einer eigens ausgebrochenen Nische am linken Grundablassstollen eingerichtet wurde. Das Schwimmloch befindet sich ebenfalls in einer Bohrung, die von der gleichen Nische etwa 30 m in den Felsuntergrund verläuft. Die Messungen werden wöchentlich durchgeführt.

Die statistischen Kenngrößen der gemessenen, wasser-/luftseitigen Verformungen sind in der Übersicht in Tabelle 1 aufgeführt.

Während des ausgewerteten Zeitraums veränderte sich die Stauhöhe um nur etwa 4 m. Die gemessenen Temperaturen schwankten um etwa ± 20 °C um den Mittelwert von 10 °C. Unter dem Einfluss dieser Wirkgrößen bewegte sich die Mauerkrone um fast ± 4 mm in Richtung Wasser- und Luftseite.

Die radialen Verschiebungen der Staumauer werden erfahrungsgemäß durch drei Größen beeinflusst:

- die Stauhöhe,
- die Lufttemperatur sowie
- die Zeit.

In der multiplen Regression werden alle drei Wirkgrößen betrachtet (s. **Tabelle 2**). Die Bestimmtheitsmaße von 63% für das Gewichtslot und 58% für die Summe der beiden Messungen deuten auf einen Zusammenhang hin. Das Maß von 19% zeigt eine schwächere Korrelation.

Anhand der F-Statistik wird der Zusammenhang zwischen Wirk- und Messgrößen überprüft. Der kritische F-Wert für eine Signifikanz von 5% ergibt sich bei den hier vorhandenen

3 Wirkgrößen und
516 gültigen Messwerten zu
2,66 (kritischer F-Wert)

Demgegenüber stehen die berechneten F-Werte von

39,4 (berechneter F-Wert) für die radialen Verschiebungen des Schwimmlotes,
291,8 (berechneter F-Wert) für die radialen Verschiebungen des Gewichtslotes und
233,9 (berechneter F-Wert) für die radialen Verschiebungen der Summe

Die wesentlich höheren berechneten F-Werte zeigen für die radialen Verschiebungen, dass die Zusammenhänge zwischen Wirkgrößen und Messgrößen nicht zufällig sind.

Mit Hilfe der t-Verteilung werden die Regressionskoeffizienten der Wirkgrößen einzeln bewertet (s. **Tabelle 3**).

Gegenüber dem kritischen t-Wert ergibt sich bei allen Regressionskoeffizienten ein größerer berechneter t-Wert. Die Regressionskoeffizienten sind daher geeignet. Besonders deutlich heben sich die t-Werte der Temperatur hervor. Der Einfluss der Stauhöhe ist wohl aufgrund der geringen Stauhöhenänderungen nicht so deutlich.

Auch der 90%-ige Vertrauensbereich der Regressionskoeffizienten enthält für alle Messwerte sinnvolle Größen in engen Bereichen.

Die Regressionsanalyse der Lotmessung führt zu guten Ergebnissen. Die Regressionskoeffizienten sind statistisch gut abgesichert, was sich auch im eng begrenzten Vertrauensbereich zeigt.

Die Regressionskurve der Summe beider Messungen (also der Kronenverschiebung)

Tabelle 3: Ergebnisse der Analyse der Wirkung der einzelnen Wirkgrößen auf die radiale Verschiebung des Lotes (+: luftseitig / -: wasserseitig)

radiale Verschiebung	t-Wert	5 %-Fraktile	Steigungsmaß (Regressionskoeffizient)	95 %-Fraktile	
Schwimmlot					
Stauhöhe	6,1	0,107	0,157	0,208	mm pro m ü. NN
Temperatur	4,4	-0,020	-0,014	-0,008	mm pro °C
Zeit	6,6	0,037	0,052	0,068	mm pro Jahr
Gewichtslot					
Stauhöhe	7,6	0,330	0,444	0,559	mm pro m ü. NN
Temperatur	28,4	-0,213	-0,200	-0,186	mm pro °C
Zeit	8,8	-0,193	-0,158	-0,123	mm pro Jahr
Summe					
Stauhöhe	8,5	0,464	0,601	0,739	mm pro m ü. NN
Temperatur	25,2	-0,230	-0,214	-0,197	mm pro °C
Zeit	4,9	-0,148	-0,106	-0,063	mm pro Jahr
kritischer t-Wert	1,65				

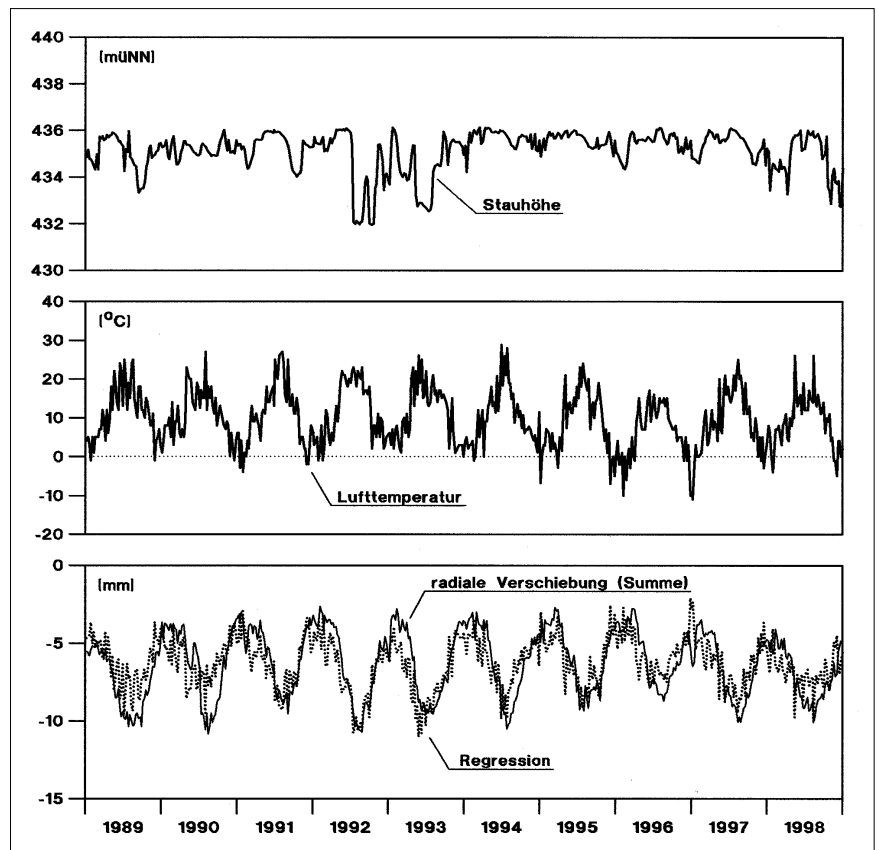


Bild 3: Wirkgrößenganglinien, Summenganglinie der radialen Verschiebungen des Gewicht- und Schwimmlotes (Kronenverschiebung) und Regression

ist in **Bild 3** dargestellt. Mit zunehmender Stauhöhe verschiebt sich die Mauerkrone zur Luftseite (0,60 mm je m / zum Vergleich: Möhnestaumauer: 0,44 mm je m) und mit zunehmender Temperatur zur Wasserseite (0,214 mm pro °C / zum Vergleich: Möhnestaumauer: 0,275 mm pro °C). Auch ein zeitlicher Faktor wird für die Verschiebung nachgewiesen, demnach bewegte sich die

Mauerkrone in den letzten 10 Jahren etwa 0,11 mm jährlich zur Wasserseite.

Der abschließend durchgeführte Chi-Quadrat-Test liefert für das Schwimmlot eine Signifikanz von 0%, was auf die geringen Bewegungen von unter 1 mm zurückzuführen ist. Die Signifikanz von 24% für das Gewichtslot und 49% für die Summe

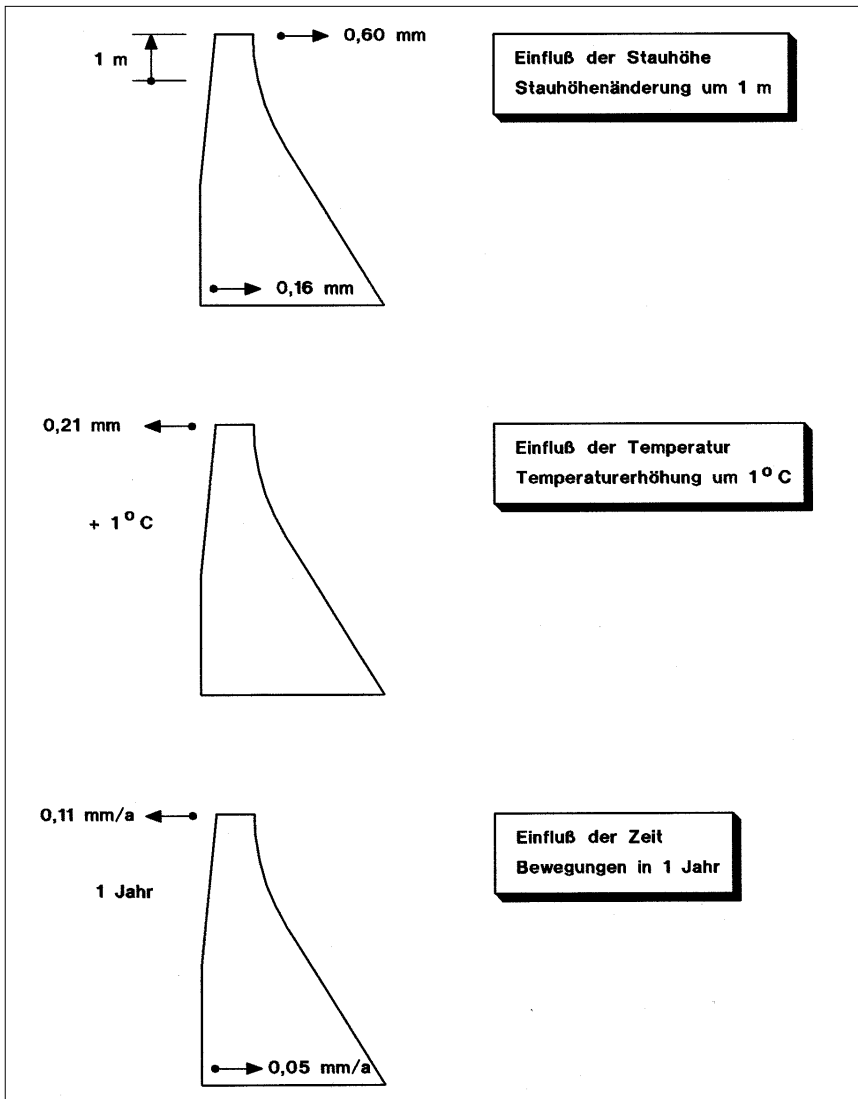


Bild 4: Bewegungen der Fürwiggestaumauer unter der Wirkung von Stauhöhe, Temperatur und Zeit (Auswertung der Messungen in den Jahren 1989 bis 1998)

zeigen, dass die maßgeblichen Wirkgrößen erfasst wurden.

Die Langzeitbetrachtung der Verformungsmessungen mit Hilfe der mathematisch-statistischen Analyse zeigt den Einfluss der relevanten Wirkgrößen auf das Bauwerk Fürwiggestaumauer. Wie jedes Tragwerk reagiert auch die Staumauer auf eine Belastung oder deren Änderung mit entsprechenden Verformungen. Hierbei muss die Last nicht unbedingt als äußere Belastung, wie der Wasserdruck, erkennbar werden. Auch Eigenspannungen im Bauwerk, die durch Temperaturänderungen der Luft und des Wassers hervorgerufen werden, belasten ein Tragwerk unter Umständen erheblich (s. [3] u. [4]).

Die Fürwiggestaumauer reagiert auf diese Belastungen, indem sie sich zur Wasser-

oder Luftseite bewegt. Die hier durchgeführte Analyse ergibt die in **Bild 4** dargestellten Bewegungen.

5 Zusammenfassung

Die Messdaten aus der Talsperrenüberwachung liefern in einer zeitnahen Auswertung Aussagen zur Sicherheit des Absperrbauwerks. Neben diesen tagesaktuellen Ergebnissen sind jedoch vertiefte Analysen der Messwerte von Bedeutung.

Hierzu empfiehlt das ATV/DVWK-Merkblatt 222 [1] die Durchführung einer mathematisch-statistischen Analyse. Es wurden verschiedene statistische Verfahren vorgestellt und am Beispiel der Lotmessung an der Fürwiggestaumauer angewendet. Erfahrungen an anderen Staumauern und -dämmen liegen vor, auch

für die Überwachung des Sickerwassers, und können beim Autor abgefragt werden.

Mit Hilfe vertiefter Analysen der Messwerte lassen sich langfristige Veränderungen des Bauwerks identifizieren und quantifizieren.

Diese Ergebnisse können Grundlage sein für die

- Planung von Sanierungen,
- Optimierung des Messprogramms sowie
- Einführung von Alarm- und Grenzwerten für die automatische Talsperrenüberwachung.

Literatur

- [1] ATV/DVWK: Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 222; 1991.
- [2] ATV/DVWK: Sicherheitsbericht Talsperren – Leitfaden; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 231; 1995.
- [3] Bettzieche, V.: Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer, Wasserwirtschaft 87 (1997).
- [4] Bettzieche, V.: Berücksichtigung von Durchsickerung und Wärmefluss beim Nachweis alter Staumauern mit der Finite Element Methode; Finite Elemente in der Baupraxis – FEM' 98; Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1998.
- [5] Kreyszig, Erwin: Statistische Methoden und ihre Anwendungen; Verlag Vandenhoeck und Ruprecht; Göttingen 1979.
- [6] Schlittgen, Rainer: Zeitreihenanalyse; Oldenbourg-Verlag; München; 1995.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Leiter der Abteilung

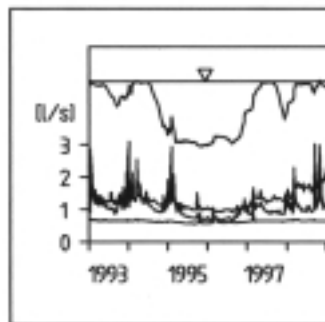
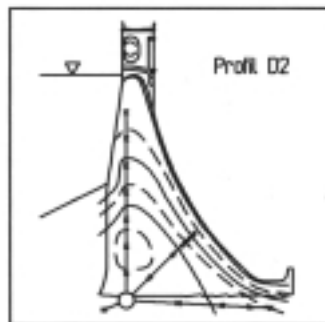
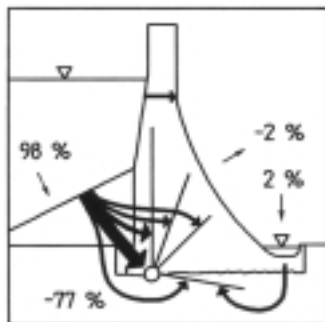
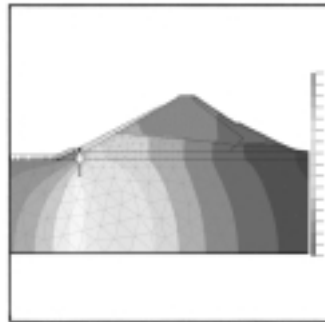
Talsperrenüberwachung und

Geotechnik, Ruhrverband

Kronprinzenstr. 37

45128 Essen

Unsere Leistungen für Ihre Talsperren...



- Jährliche Sicherheitsberichte
- Vertiefte Überprüfungen
- Geologische Untersuchungen
- Hydraulische Nachweise
- Standsicherheitsnachweise
- Sanierungsplanung und Bauleitung

RWG

Ruhr-Wasserwirtschafts-
Gesellschaft mbH

Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen
Tel. 0201 / 178-1315

Ein Unternehmen des

 Ruhrverband