

Trend- und Sprunganalyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung unter Berücksichtigung des Einflusses äußerer Größen

Von Daniela Böcker,
Andreas Schumann
und Volker Bettzieche

Die Auswertung der Überwachungsdaten ist für die Einschätzung der Standsicherheit einer Talsperre von wesentlicher Bedeutung. Die hier vorgestellten statistischen Verfahren eignen sich, die signifikanten lang- und kurzfristigen Veränderungen des Verformungs- und Durchsickerungsverhaltens vor dem Hintergrund der Variabilität der Zustandsgrößen herauszufiltern. Wichtigste Methoden sind die Regressionsanalyse sowie Testverfahren zur Aufdeckung von Trends und Sprüngen. Bei der Anwendung der Verfahren auf die Überwachungsdaten verschiedener Talsperren des Ruhrverbandes zeigte sich, dass Zeiträume mit Veränderungen im langfristigen Bauwerksverhalten identifiziert werden können.

1 Einleitung

Die Auswertung der Überwachungsdaten ist für die Einschätzung der Standsicherheit und Dauerhaftigkeit eines Staudamms oder einer Staumauer von wesentlicher Bedeutung. Zur Erfassung des Durchsickerungs- und Verformungsverhaltens eines Absperrbauwerkes werden vielfältige Messdaten erhoben, die Veränderungen des Bauwerks dokumentieren sollen, aber meist durch äußere Einflüsse,

wie die Lufttemperatur oder die Stauhöhe, überprägt sind.

Im DVWK-Merkblatt 222/1991 „Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen“ [1] wird daher zur Interpretation des Langzeitverhaltens die mathematisch-statistische Analyse empfohlen. Ziel einer solchen Analyse ist es, die Wirkung äußerer Einflussfaktoren herauszufiltern, um eine Beurteilung des

„reinen“ Bauwerksverhaltens über einen längeren Zeitraum zu ermöglichen.

Die bisher entwickelten statistischen Verfahren [2], [3] nutzen die Regressionsanalyse, um einen Trend in den Daten über den gesamten untersuchten Zeitraum aufzudecken. Weisen die Daten sprunghaftes Verhalten auf oder ändert sich ein Trend über die Zeit, können diese Verfahren hierüber keinen Aufschluss geben.

Anhand der im Folgenden vorgestellten Verfahren können zeitliche Veränderungen im Bauwerksverhalten diagnostiziert werden, indem statistisch signifikante Sprünge oder Trendänderungen in den Messreihen aufgedeckt und quantifiziert werden.

2 Statistische Analyse

Die Analyse des Bauwerksverhaltens erfordert die Differenzierung zwischen Veränderungen, die auf äußere Einflüsse und Veränderungen des Bauwerks selbst zurückzuführen sind. Daher erfolgt die Analyse der Messdaten in zwei Schritten. Der erste beinhaltet die Bestimmung und Quantifizierung der äußeren, die Messdaten beeinflussenden Größen. Im zweiten Schritt wird die zeitliche Variabilität

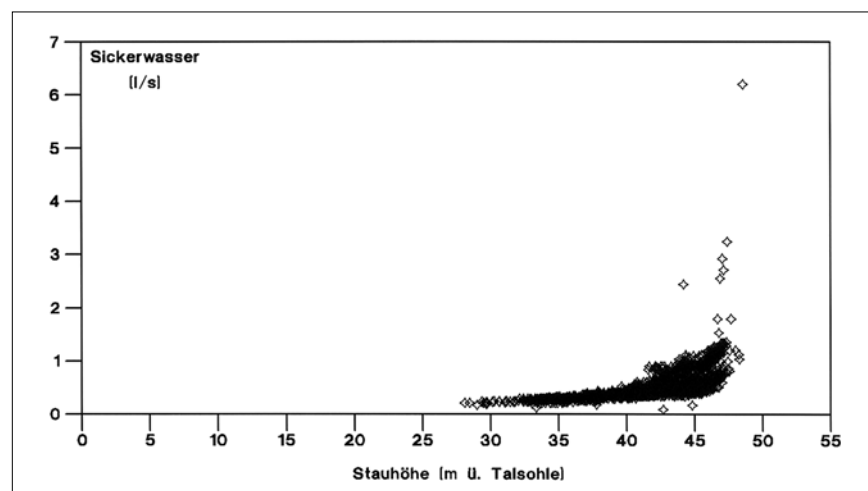


Bild 1: Beispiel für das Streudiagramm der Stauhöhe einer Sickerwassermessung

Sonderdruck

des Bauwerkverhaltens untersucht. Eine bewährte Methode zur Erfassung des Zusammenhangs zwischen Messdaten und Einflussgrößen stellt die multiple Regressionsanalyse dar. Durch Aufstellung der Regressionsgleichung wird eine näherungsweise Beschreibung der Messdaten als lineare Funktion der Einflussgrößen ermöglicht.

Die Differenzen zwischen den gemessenen Werten und den Ergebnissen der Regressionsberechnung stellen die um die reversible Wirkung äußerer Einflussfaktoren „bereinigten“ Daten dar. Anhand dieser so genannten Residuen wird die zeitliche Variabilität durch Anwendung einer Sprunganalyse beurteilt.

Im Rahmen dieser Sprunganalyse werden unter Verwendung von statistischen Tests Bruchstellen in einer Zeitreihe ermittelt, wobei die entstehenden Teilreihen wiederum einzeln auf Trends untersucht werden. Die Signifikanzbewertung erfolgt anhand der Sprunghöhen und der Steigungsmaße.

2.1 Einsatz der multiplen Regression zur Bestimmung und Quantifizierung der Einflussgrößen

Die multiple Regression beschreibt Messwerte anhand von Einflussgrößen als lineare Gleichung der Form:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon$$

mit

- y Messgröße
- x_i Einflussgrößen
- β_i Regressionskoeffizienten der Einflussgrößen i
- ε Residuum

Der erste Schritt zur Bestimmung der Regressionsgleichung ist die Ermittlung der äußeren Einflussgrößen. Die an den Talsperren gemessenen Messgrößen, wie Stauhöhe, Niederschlag und Lufttemperatur, werden zunächst kombiniert. Neben der Verwendung zeitgleicher Messwerte ist hierbei die Berücksichtigung von Werten aus dem vorhergehenden Zeitraum, z. B. in Form gleitender Mittelwerte, sinnvoll.

Mit dem Verfahren der Rückwärtselimination werden aus diesem Einflussgrößen-Katalog die für das Modell maßgebenden ausgewählt. Dabei werden nur solche Einflussfaktoren im Modell berücksichtigt, die untereinander keine Abhängigkeiten aufweisen (Ausschluss der Multikollinearität). Ist die Auswahl der Einflussgrößen abgeschlossen, wird anhand von Streudiagrammen für jede Einflussgröße geprüft, ob ein nichtlinearer Zusammenhang zur Messgröße besteht. **Bild 1** zeigt beispielhaft die Streuung einer Sickerwassermessung gegenüber der Stauhöhe. Hier kann von einer nichtlinearen Beziehung ausgegangen werden.

Liegt ein nichtlinearer Zusammenhang vor, so muss die betrachtete Einflussgröße zunächst transformiert werden, um die Bedingung einer linearen Regressionsbeziehung zu erfüllen. In **Tabelle 1** sind die geprüften Transformationen aufgelistet.

2.2 Zeitliche Variabilität

Die multiple Regression liefert in Form der Residuen die Daten für eine Analyse der zeitlichen Variabilität. Diese Daten werden zunächst auf Sprünge untersucht. Als Sprungstellen werden dabei sowohl plötzliche Brüche in der Zeitreihe als

Tabelle 1: Katalog der Transformationen der Einflussfaktoren

Lineare Form	$y = \alpha x'$
Transformation	$x' = x^2$
	$x' = x^3$
	$x' = x^4$
	$x' = x^5$
	$x' = \sqrt{x}$
	$x' = \ln(x)$
	$x' = \log(x)$
	$x' = e^x$
	$x' = 1/x$

auch Stellen, an denen sich der Anstieg der Trendgeraden statistisch signifikant ändert, betrachtet. Je nach Eignung für die vorliegende Messreihe werden als Testverfahren der Mann-Whitney-Test (modifiziert) bzw. der Chow-Test verwendet. Der Mann-Whitney-Test vergleicht die Mittelwerte zweier Stichproben, der Chow-Test dagegen den Anstieg zweier Trendgeraden.

Da a priori nicht bestimmt werden kann, an welcher Stelle der Zeitreihe sich derartige Sprungstellen ergeben und wo dementsprechend die gesamte Zeitreihe in zwei Teilreihen zu unterteilen ist, werden die statistischen Tests zur Suche nach Teilungspunkten genutzt. Es wird ein variabler Teilungspunkt vorgegeben, für den dann überprüft wird, ob an ihm tatsächlich eine statistisch signifikante Sprungstelle vorliegt.

Um jeden Punkt der Zeitreihe zu überprüfen, wird der Teilungspunkt gleitend über die gesamte Stichprobe bewegt und der Test für die jeweils entstehenden beiden Stichproben durchgeführt. Als Sprungstelle wird der Punkt definiert, an dem der Betrag der jeweiligen Testgröße maximal wird. Die so entstandenen Teilstichproben werden ihrerseits getrennt weiter untersucht und ggf. weiter unterteilt, bis keine Sprungstelle mehr identifiziert werden kann.

Für diese Teilreihen wird einzeln geprüft, ob ein linearer Trend vorhanden ist; maßgebend für dessen Signifikanz ist das Trend-Rausch-Verhältnis. Ist ein signifikanter Trend feststellbar, wird die Steigung der Teilreihe mittels Einfachregression über die Zeit ermittelt.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse werden die Regressionsgeraden aller Teilreihen sowie die Sprunghöhen in einem Diagramm mit den Residuen der multiplen Regression graphisch aufgetragen. Für die Teilreihen ohne Trend wird an-

Analysis of Shifts and Trends of Monitoring Data at Dams with Consideration of the Influence of Variables Measured Externally

by Daniela Böcker, Andreas Schumann and Volker Bettzieche

The evaluation of monitoring data is substantial for the assessment of the stability of a dam. The statistic procedures presented here are suitable to identify the significant long and short term changes of the deformation and percolation considering the variability of the variables of state. Most important methods are the regression analysis as well as test procedures for the identification of trends and shifts. The application of the developed procedures, presented by the monitoring data of different dams of the Ruhrverband, showed up that periods with changes of the long-term behaviour can be identified.

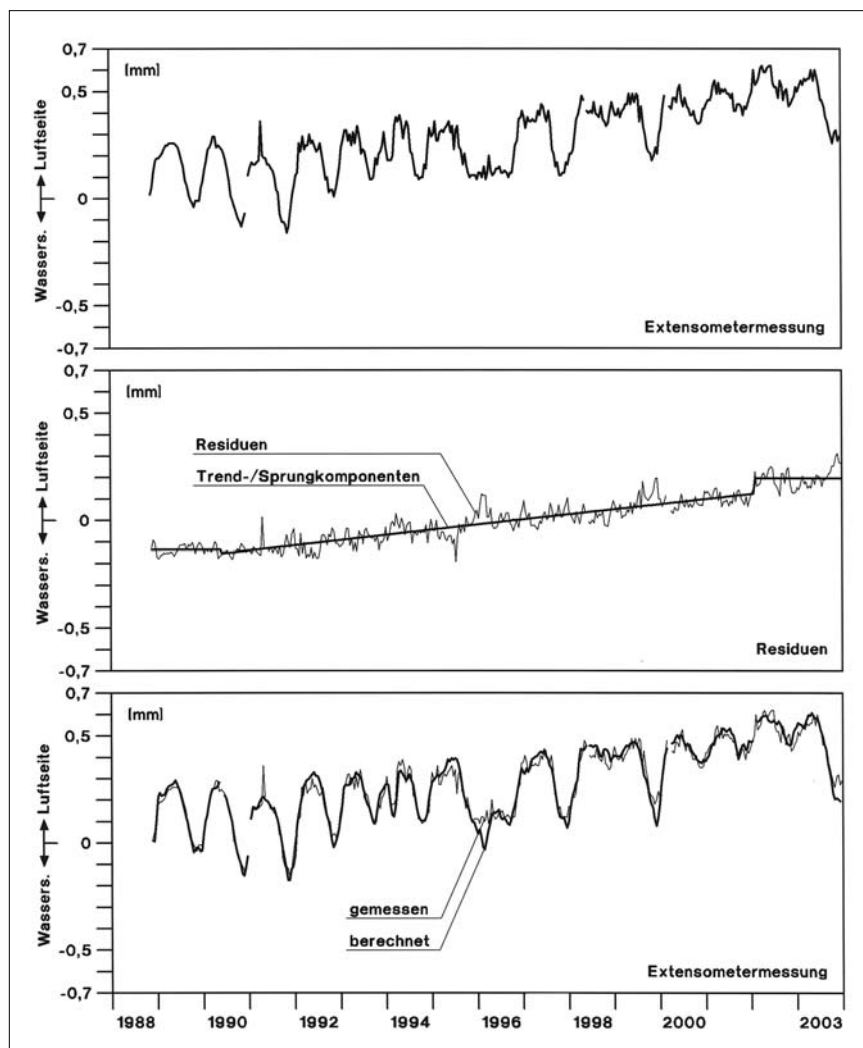


Bild 2: Messwerte (oben), Residuen aus der multiplen Regression mit Trend- und Sprungkomponenten (Mitte) und Vergleich der gemessenen mit den berechneten Werten (unten) des Extensometers am rechten Hang der Möhnestaumauer

stelle der Regressionsgeraden deren Mittelwert als Gerade aufgetragen. In **Bild 2** ist ein solches Diagramm für das Beispiel einer Extensometermessung gezeigt.

Als Qualitätsmaß für die Güte der Anpassung wird der durch das Modell erklärte Anteil der Varianz an der Gesamtvarianz, also der Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert, herangezogen. Diese – im Folgenden als „gesamte erklärte Varianz“ bezeichnet – ergibt sich aus dem Bestimmtheitsmaß der multiplen Regression sowie dem Anteil der Varianz der Residuen der multiplen Regression, der durch eine nachgeordnete Trend- und Sprunganalyse erklärt werden kann (als „erklärte Varianz“ eingeführt).

Durch die Differenzbildung zwischen den berechneten Trend- und Sprungkomponenten und den Residuen der multiplen

Regression ergeben sich die Residuen des Gesamtmodells, also die Anteile der Messdaten, die weder durch äußere Einflussgrößen noch durch eine zeitliche Veränderung erklärt werden.

Sind diese Residuen normalverteilt, bedeutet dies, dass die wichtigen Einflussfaktoren erfasst worden sind, das statistische Modell die Zusammenhänge also hinreichend beschreiben kann. Das Vorliegen einer Normalverteilung wird hier mit dem Chi-Quadrat-Anpassungstest geprüft.

2.3 Ergebnisse am Beispiel der Möhnetal Sperre

Die 1913 als Gewichtstaumauer erbaute, etwa 40 m hohe Möhnetal Sperre des Ruhrverbands staut das Wasser der Möhne mit einem Volumen von 134,5 Mio. m³. Zur Überwachung der horizontalen Verschie-

bungen des Mauerfußes wurden vom Kontrollstollen aus wasserseitig Stangenextensometer angeordnet, die bis unter den Stauraum reichen und dort im Fels verankert sind.

Für die Extensometermessung am rechten Hang werden als maßgebende äußere Einflussgrößen die über 20 Tage gemittelte Stauhöhe sowie die über 14 Tage gemittelte Temperatur identifiziert. Transformationen dieser Einflussgrößen ergeben keine Verbesserung der Schätzung der Regressionsgleichung. Durch die beiden genannten Faktoren können 52% der Varianz der Messdaten erklärt werden; steigt die durchschnittliche Stauhöhe um 1 m an, bewegt sich der Mauerfuß um 0,045 mm in Richtung Luftseite; steigt die über 14 Tage gemittelte Temperatur um 1 °C an, verschiebt er sich um 0,003 mm in Richtung Luftseite. **Tabelle 2** fasst die wichtigsten Ergebnisse der gesamten Analyse zusammen.

Im Rahmen der Sprunganalyse werden für den Zeitraum von 1988 bis 2003 zwei Sprungstellen ermittelt. Die mittlere Teilreihe weist einen Trend auf. In Bild 2 wird deutlich, dass auch Zeitpunkte – wie hier im Mai 1990 – zu denen eine Änderung des Trends stattgefunden hat, als Sprungstellen identifiziert werden. Diese Zeitkomponenten bestimmen 88% der Varianz der Residuen der multiplen Regression. Insgesamt können anhand der Analyse 94% der Varianz in der Messreihe erklärt werden. Bei allen Messungen sind die Residuen nach Elimination der Zeitkomponente normalverteilt, das Modell beschreibt die Daten also hinreichend genau (Tabelle 2).

3 Zusammenfassung und Bewertung

Statistische Verfahren sind die Grundlage einer Auswertung von Messwerten der Talsperrenüberwachung. Das inzwischen etablierte Verfahren der multiplen Regression kann durch die Transformation der Einflussgrößen auch nichtlineare Effekte berücksichtigen. Das Verhalten eines Staumamms oder einer Staumauer kann auf die Wirkung von äußeren Einflüssen, wie beispielsweise Stauhöhe und Temperatur, zurückgeführt werden.

Darüber hinaus identifiziert die Sprungstellenanalyse Änderungen im Bauwerksverhalten, die nicht durch äußere Einflüsse begründet werden können. Gerade diese Änderungen sind jedoch für die si-

Tabelle 2: Ergebnisse der multiplen Regression sowie der Sprunganalyse für die Extensometermessung am rechten Hang der Möhnestaumauer

Selektierte Einflussgrößen und Bestimmtheitsmaß		
Stauhöhe 20-d-Durchschnitt [m ü. NN]	t-Wert = 20,2	p-Wert = 0,00
Temperatur 14-d-Durchschnitt [°C]	t-Wert = 2,7	p-Wert = 0,01
Multipl. Bestimmtheitsmaß	0,52	
Regressionskoeffizienten der Einflussgrößen und ihre Standardfehler		
Regressionskoeffizient (Steigungsmaß) gegenüber	Stauhöhe 20-d-Durchschnitt [mm pro m ü. NN]	0,0451
	Temperatur 14-d-Durchschnitt [mm pro °C]	0,0026
Standardfehler des Regressionskoeffizienten	Stauhöhe 20-d-Durchschnitt [mm pro m ü. NN]	0,0022
	Temperatur 14-d-Durchschnitt [mm pro °C]	0,0010
Ergebnisse der Sprunganalyse		
Anzahl Sprünge	2	
Erklärte Varianz	0,883	
p-Wert der Chi-Quadrat-Verteilung	0,4329	
Residuen normalverteilt	ja	
Gesamte erklärte Varianz	0,94	
Steigungsmaße für die durch Sprungstellen erzeugten Teilreihen bei signifikantem Trend [mm/a]		
21.11.88 bis 21.05.90	-	
05.06.90 bis 22.01.02	0,024	
04.02.02 bis 23.12.03	-	

cherheitstechnische Beurteilung eines Absperrbauwerkes von wesentlicher Bedeutung. Durch die quantitative Beschreibung ist es möglich, Konsequenzen solcher Bauwerksanomalien aus bautechnischer oder geologischer Sicht zu beurteilen.

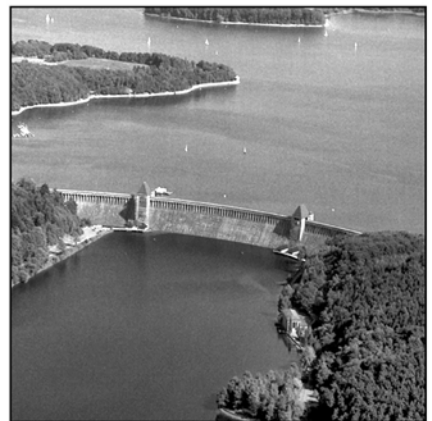
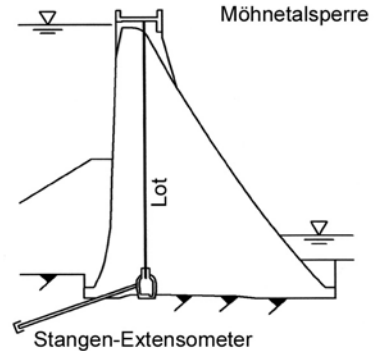
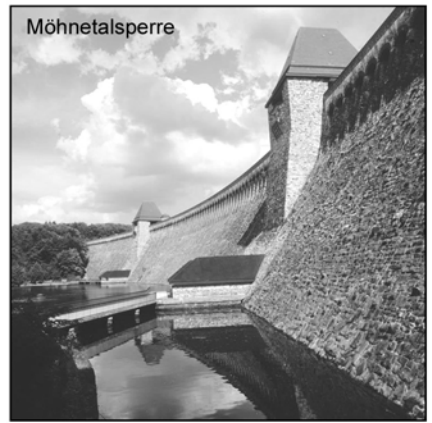
Die vorgestellten Verfahren werden vom Ruhrverband bei der Vertieften Überprüfung seiner Talsperren angewandt [4].

Literatur

- [1] DVWK (Hrsg.): Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen. In: DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 1991, Heft 222.
- [2] Bettzieche, V.: Mathematisch-statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. In: Wasserwirtschaft, 94 (2004), Heft 1-2.
- [3] Kittler, J.; Horlacher, H.-B.; Standfuß, M.; Müller, U.: Neue Aspekte bei der Auswertung von Überwachungsmessungen an Betonstaumauern in Sachsen. In: Wasserwirtschaft, 94 (2004), Heft 1-2.

- [4] Böcker, D.: Statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, 2005 (unveröffentlicht).

Anschrift der Verfasser:
 Dipl.-Ing. Daniela Böcker
 Ruhr-Wasserwirtschafts-Gesellschaft mbH
 Kronprinzenstraße 37
 45128 Essen
 daniela.boecker@gmx.de
 Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schumann
 Lehrstuhl für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum
 andreas.schumann@rub.de
 Dr.-Ing. Volker Bettzieche
 Ruhrverband, Kronprinzenstraße 37
 45128 Essen, vbe@ruhrverband.de



Unsere Leistungen für Ihre Talsperren ...

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



Ruhr-Wasserwirtschafts-Gesellschaft mbH

Ein Unternehmen des Ruhrverbands

Kronprinzenstr. 37 Tel. 0201 / 178-1315
 45128 Essen www.rwg-mbh.com