

# Elektronische Messdaten – statistische Analysen bei einem Staudamm mit Asphaltoberflächendichtung

Von Jörg Franke,  
Jan Bliefernicht,  
Tobias Gebler,  
Fritz Neuschitzer  
und Silke Wieprecht

Der überwachende Ingenieur gewährleistet durch seine Tätigkeit die öffentliche Sicherheit von Wasserbauten. Neben visuellen Befunden stehen ihm heute durch die technische Entwicklung viele Möglichkeiten der Datenbeschaffung und -übermittlung bis zu ihrer Auswertung zur Verfügung. Dabei stellt sich die Frage, ob die seit einigen Jahren automatisch erhobenen Daten sinnvoll für eine statistische Auswertung nutzbar sind und welche Beziehungen zwischen Messwerten und Einflussgrößen bestehen. Mittels schrittweiser multivariater Regression sowie des systematischen Vergleichs von automatischen mit manuellen Messdaten werden diese Fragen im Rahmen der vorliegenden Arbeit beleuchtet.

## 1 Einleitung

Die Notwendigkeit einer umfassenden Überwachung von Talsperren wird in der neu aufgelegten deutschen Stauanlagen-Norm [2] unterstrichen.

Die mit der Talsperrenüberwachung betrauten Ingenieure – in Österreich beispielsweise gesetzlich als Talsperrenverantwortliche mit festgelegten Pflichten in § 23a des Wasserrechtsgesetzes [3] definiert – sind bei ihrer Arbeit mit einer Fülle von Daten konfrontiert. Neben offensichtlichen Schwachstellen gilt es, die komplexen Zusammenhänge der Funktion der Bauwerke zu analysieren und Veränderungen möglichst früh zu erkennen. Inwieweit Expertensysteme dazu einen Beitrag leisten können, wird sich in der Zukunft zeigen. Ein Ansatz der erweiterten Datenanalyse ist die statistische Verarbeitung. Die Auswertung der automatisch an der Talsperre erhobenen Messdaten soll durch den Vergleich mit einer Ausgabe des simulierten Messwertes erleichtert werden. Den Ingenieuren könnte so neben der Analyse der Daten unter Zugrundelegung der Erfahrung und der Kenntnis des Bauwerkes auch ein aus den örtlichen Randbedingungen (z. B. Wasserstand, Niederschlag etc.) ermittelter, zu erwartender generierter Wert an die Hand gegeben werden. Hierzu wird im Rahmen dieser Arbeit die schritt-

weise multivariate Regression herangezogen.

Um die Qualität der Werte des automatisierten Messsystems möglichst objektiv zu betrachten, werden die automatischen mit den manuell erhobenen Daten verglichen und statistisch ausgewertet. Die Zeitreihenanalyse zur Untersuchung des Trendverhaltens der automatischen Messdaten erwies sich aufgrund des verhältnismäßig kurzen Zeitraumes der Niederschlagsmessdaten als wenig aussagekräftig [5].

## 2 Das Kraftwerkssystem Fragant mit dem 50 m hohen Hochwurtendamm

Der 1981 fertig gestellte Hochwurtendamm liegt auf 2400 m über Adria in den Hohen Tauern Kärntens und ist Teil des Speichersystems der Kraftwerksgruppe Fragant der Kärntner Elektrizitätsaktiengesellschaft (KELAG) mit einer maximalen installierten Leistung aller Kraftwerke von 334 MW (**Bild 1**). Der Fels- und Steinschüttdamm ist an der Wasserseite mit einer



Bild 1: Ansicht des Hochwurtendamms

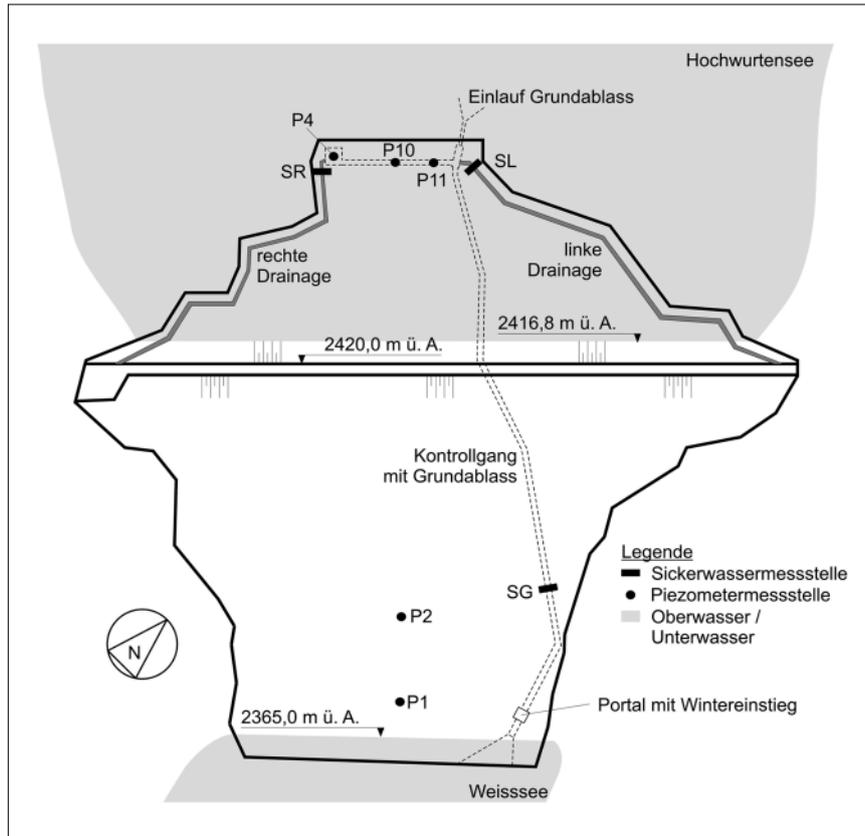


Bild 2: Lageplan des Hochwurtendamms mit Messstellen

Asphaltoberflächendichtung versiegelt, hat eine Höhe von 50 m und eine Kronenlänge von 260 m. Er riegelt an einer Felsengestelle ein vom Gletscher geschaffenes Kartal ab und bildet ein Speichervolumen von 13,2 Mio. m<sup>3</sup>. Das Einzugsgebiet des Jahrespeichers beträgt mit Beileitungen und Pumpsystemen insgesamt 12,5 km<sup>2</sup>. Der Vorspeicher Weisssee staut den Dammfuß geringfügig ein.

Für die Analyse sind folgende Daten seit 2001 als Stundenmittelwerte verfügbar: Oberwasserstand (Hochwurtensee), Unterwasserstand (Weisssee), Grundwasserstände von fünf Piezometern (P1, P2, P4, P10, P11) und drei Sickerwasserabflüssen (SL, SR, SG) (Bild 2 und 3). Am benachbarten Schwarzsee werden der Niederschlag seit Ende 2002 als Tagessumme und die Lufttemperatur seit Mitte 2002

alle 20 Minuten erhoben. Die manuellen Messungen der Wasserstände, Grundwasserstände und Sickerwasserabflüsse liegen ca. 14-täglich vor und reichen teilweise bis zum ersten Vollstau 1982 zurück.

### 3 Schadensmechanismus

Die Sickerwasserabfluss- und Piezometermessstellen erfassen Änderungen in der Sickerlinie des Damms. Daher sind Auswerteverfahren für diese Daten äußerst sinnvoll für das Erkennen von Drainageschäden und Fehlstellen in der Oberflächendichtung. Diese könnten durch Alterung und Versprödung, Schäden infolge Eisdruck, Kriechen und Schwinden der Materialien, Rissbildungen infolge Temperatureinwirkung oder Differenzsetzungen bei Herdmauerübergängen hervorgerufen werden. Bei größeren Rissen besteht die Gefahr von Sickerungsfolgeschäden, wie beispielsweise innere Erosion, weshalb einer frühzeitigen Erkennung besondere Bedeutung zukommt.

### 4 Vergleich der automatisch erfassten Daten mit den manuellen Kontrollmessungen

Bei einem systematischen Vergleich der automatisch erfassten Daten mit den manuellen Kontrollmessungen ist zu beachten, dass nur ein relativer Unterschied zu erkennen ist, da keiner der beiden Messwerte als wahr angenommen werden kann [1]. Beide Größen streuen um den Erwartungswert mit einer zufälligen und systematischen Messabweichung. Ziel ist es, die systematische Komponente zu erkennen, um Kalibrierungen der Messgeräte vornehmen zu können. Grobe Fehler im Datensatz, wie beispielsweise durch Funktionstests der Geräte hervorgerufen, werden umgehend bereinigt.

Die ermittelten Differenzen zwischen den manuellen Kontrollmessungen und den zugehörigen, für den entsprechenden Tag ausgefilterten, automatischen Werten sind verhältnismäßig gering. Die Piezometer 2, 4, 10 und 11 sowie die Sickerwassermessstellen SG und SL treffen den Mittelwert relativ genau, bei SR sind die manuellen Messwerte um einen Faktor von ca. 1,2 höher als die automatischen. Bei P1 ist ein Versatz von 2,5 m festgestellt worden, der jedoch auf eine falsche Positionierung beim Messgeräustausch zurückzuführen ist. Die Standardabweichung der Differenzwerte der Mittelwerte der Piezometer liegt zwischen 4 mm (P10) und 28 mm (P2)

## First Advanced Analysis of Automated Measured Data of a Dam with an Asphaltic Upstream Facing

by Joerg Franke, Jan Bliefernicht, Tobias Gebler, Fritz Neuschitzer and Silke Wieprecht

Company engineers predominantly are responsible for the safety of hydraulic structures with respect to coordination of data collection as well as their transmission and interpretation. The present study documents the verification of the usability of automated read monitoring data concerning their subsequent statistical analysis. The comparison of automated readings with manual control measurements shows, that the measuring system of the Hochwurt Dam is working reliable and nearly without malfunction. Using the stepwise multivariate regression method, the annual dynamic behaviour of the seepage flow and the piezometer data are represented quite exactly. The regression analysis detects fairly well the external influences which contribute most to the measured values. Yet, the influence of precipitation could not be reproduced as expected. However, a deeper understanding of the structure can be gained by applying the regression method and more detailed information is being delivered than in traditionally created graphs.

Tabelle 1: Ergebnisse: links: Vergleichs der automatischen und manuellen Messdaten; rechts: Regressionsanalyse (o = ist signifikant, x = ist nicht signifikant)

| Messstelle | Messdatenvergleich<br>automatisch-manuell                       |  |  |   | Schrittweise multivariate Regressionsanalyse |                |     |   |             |      |      |      |
|------------|---|--|--|---|--|----------------|-----|---|-------------|------|------|------|
|            | Mittelwert der<br>automatischen<br>Messwerte<br>[l/s]/[m ü. A.] | Mittelwert der<br>manuellen<br>Kontroll-<br>messungen<br>[l/s]/[m ü. A.] | Mittelwert der<br>Differenzen<br>[l/s]/[m] | Standard-<br>abweichung der<br>Differenzen<br>[l/s]/[m] | Kalibrierung                                 |                |     |   | Validierung |      |      |      |
|            |   |  |  |   | November 2002 bis Mai 2006                   |                |     |   | 2003        | 2004 | 2005 |      |
|            |   |  |  |   | B  | Einflussgrößen |     |   | B           | B    | B    |      |
| [-]        | T   | N  | OW   | UW  | [-]  | [-]            | [-] |   |             |      |      |      |
| SG         | 2,580   | 2,544  | + 0,036                                    | 0,360   | 0,95   | o              | o   | o | o           | 0,94 | 0,97 | 0,95 |
| SL         | 0,854   | 0,838  | + 0,016                                    | 0,101   | 0,77   | o              | o   | o | o           | 0,76 | 0,65 | 0,73 |
| SR         | 1,233   | 1,410  | - 0,177                                    | 0,149   | 0,96   | o              | x   | o | o           | 0,92 | 0,98 | 0,97 |
| P1         | 2363,912  | 2364,158   | - 0,246                                    | 0,742   | 0,92   | o              | o   | o | o           | 0,86 | 0,92 | 0,87 |
| P2         | 2364,115  | 2364,105   | + 0,010                                    | 0,028   | 0,90   | o              | o   | o | o           | 0,87 | 0,91 | 0,89 |
| P4         | 2368,152  | 2368,150   | + 0,002                                    | 0,012   | 0,58   | o              | o   | o | o           | 0,55 | 0,62 | 0,54 |
| P10        | 2367,038  | 2367,038   | 0,000                                      | 0,004   | 0,87   | o              | x   | o | o           | 0,92 | 0,74 | 0,85 |
| P11        | 2366,825  | 2366,827   | - 0,002                                    | 0,007   | 0,83   | o              | x   | o | x           | 0,92 | 0,61 | 0,69 |

und der Sickerwasserabflüsse zwischen 0,101/s (SL) und 0,361/s (SG) (Tabelle 1).

Die Ausfallrate aller automatischen Messgeräte beträgt im Beobachtungszeitraum ca. ein Prozent und wurde meist durch unvermeidliche Umbauarbeiten sowie Softwareupdates verursacht.

### 5 Schrittweise multivariate Regressionsanalyse

Für die Regression werden Tagesmittelwerte verwendet, die aus den Stundenmittelwerten berechnet werden. Als mögliche Einflussgrößen werden der Ober- und Unterwasserstand  $h_1$  und  $h_2$ , die mittlere Lufttemperatur  $T$  der vergangenen 15 Tage und der Niederschlag  $N$  ausgewählt. Sie gehen linear in das Modell ein. Des Weiteren werden der Potenzialunterschied zwischen dem Ober- und Unterwasserstand und die benetzte Fläche der Oberflächendichtung berücksichtigt, so dass sich folgender Regressionsmodellansatz für die Grundwasserstände und Sickerwasserabflüsse ergibt [5]:

$$y = a_0 + a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_1 h_2 + a_4 h_1^2 + a_5 h_1^2 h_2 + a_6 h_1^3 + a_7 T + a_8 N (I)$$

Beim Niederschlag ist allerdings zu berücksichtigen, dass nur der Niederschlag verwendet wird, der nicht in der Schneedecke gespeichert wird. Als Entscheidungskriterium hierfür wird die mittlere Lufttemperatur der vergangenen 15 Tage herangezogen.

Nachdem das Regressionsmodell aufgestellt ist, wird mit einem statistischen Test überprüft, welche Einflussgrößen zu einer signifikanten Verbesserung der Modellstruktur beitragen und somit in Gl. (1) ver-

bleiben können. Diese leisten einen signifikanten Beitrag zum generierten Wert für das jeweilige Messgerät. Als statistischer Test wird die Bootstrappmethode [4] genutzt.

Bevor dieses Regressionsmodell angewendet werden kann, wird zunächst überprüft, ob es in der Lage ist, den zu beschreibenden Prozess wiederzugeben. Dies erfolgt, indem die Daten in zwei Zeiträume unterteilt werden. Der erste Zeitraum dient dazu, das Modell zu kalibrieren, während der zweite, in diesem Fall einjährige Zeitraum für die Validierung genutzt wird. Dabei wird der Schritt der Kalibrierung und der Validierung zweimal wiederholt, wobei jedes Mal ein neuer Zeitraum (2003/2004/2005) für die Validierung verwendet wird. So kann das Regressionsmodell über einen längeren Zeitraum auf seine Eignung hin überprüft werden. Die Güte der Regression wird mit dem Bestimmtheitsmaß  $B$  beurteilt. Ist das Bestimmtheitsmaß größer als 0,7,

dann liegt eine hohe Güte vor. Die Regression ist perfekt, wenn das Bestimmtheitsmaß 1,0 ist.

Die Ergebnisse und generierten Ganglinien zeigen, dass die jahreszeitliche Dynamik des Sickerwasserabflusses mit dem gewählten Regressionsmodell gut wiedergegeben werden kann (Tabelle 1 und Bild 4). Allerdings kann die ereignisspezifische Dynamik, ausgelöst durch Niederschläge, nicht eindeutig simuliert werden, obwohl die Niederschlagskomponente als signifikante Größe in das Modell integriert wird. Eine mögliche Ursache hierfür ist die unzureichende Lage der Niederschlagsmessstation, die sich in einigen Kilometern Entfernung zum Hochwurtendamm befindet.

Daher werden nicht alle relevanten Niederschlagsereignisse bzw. Schmelzwassereinflüsse registriert. Auch die Dynamik der Grundwasserstände kann im Jahresverlauf gut wiedergegeben werden. Je-



**Kohlendioxid-Verursacher sollen zahlen! Bitte senden Sie mir Ihr Info-Paket:**

CD-ROM „Haftung Klimawandel“ (3x1,56 €)

„Klimawandel“-Begleitheft (2x1,56 €)

Aktionsinfos zur Klima-AUSBADE-Kampagne (1,56 €)

(Bitte in Briefmarken zu je 1,56 € beilegen!)

Name: \_\_\_\_\_

Straße: \_\_\_\_\_

PLZ/Ort: \_\_\_\_\_

GERMANWATCH e.V.  
Kaiserstr. 201, 53113 Bonn  
germanwatch@germanwatch.org  
www.klimausbadekampagne.de

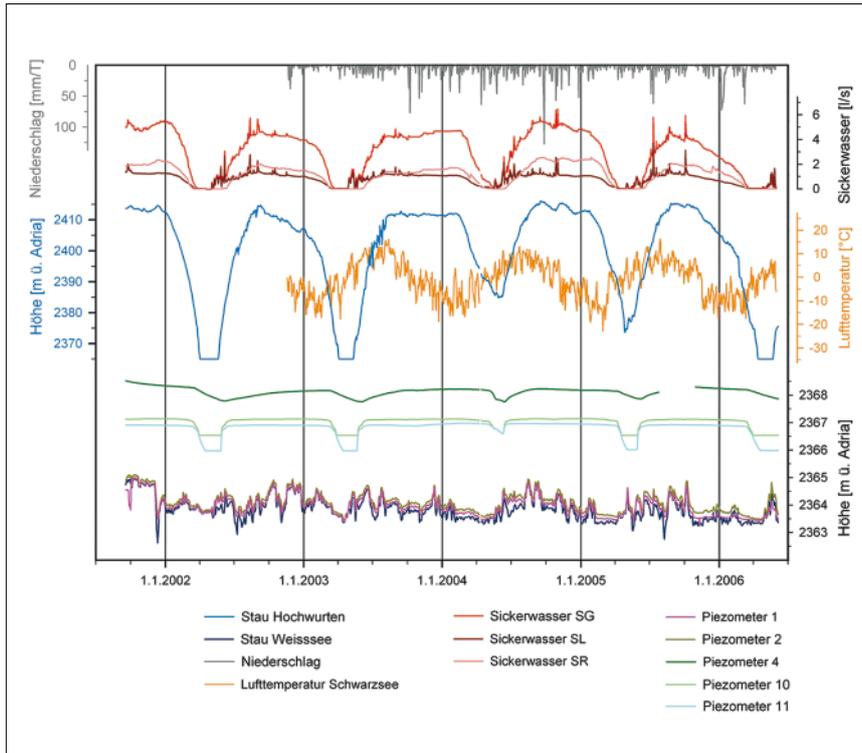


Bild 3: Verfügbare Datenbasis automatischer Messwerte

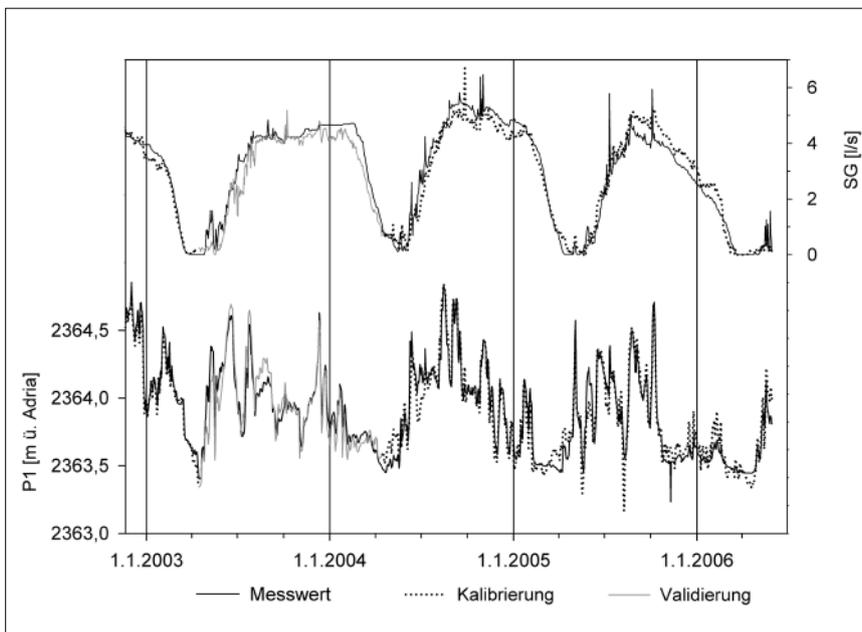


Bild 4: Ergebnisse der Regression für die Messstellen P1 und SG

doch ist zu beachten, dass die Piezometer 1 und 2 sehr stark vom Wasserstand des Weisssees beeinflusst werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchungen war die Überprüfung der Brauchbarkeit des automatischen

Messsystems für eine nachfolgende Auswertung mittels statistischer Verfahren.

Der Vergleich der automatischen Messungen mit den manuellen Kontrollmessungen zeigt, dass das automatische Messnetz des Hochwurtendammes zuverlässig und nahezu ausfallfrei arbeitet. Nach Bereinigung der Messdaten von groben Fehlern

ist der Datensatz grundsätzlich zur statistischen Auswertung geeignet.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass mittels schrittweiser multivariater Regressionsanalyse die jahreszeitliche Dynamik der Sickerwasserabflüsse und Piezometermesswerte gut getroffen werden kann. Die Regressionsanalyse zeigt, welche äußeren Einflüsse den größten Beitrag zum Betrag des einzelnen Messwertes leisten. Dies ist bei der herkömmlichen Auswertung von grafischen Darstellungen kaum möglich. Der Niederschlagsanteil am Sickerwasser kann noch nicht wie erwartet abgebildet werden. Dadurch wird deutlich, dass der Einbau von neuen Messrichtungen zur erweiterten Dokumentation des Sperrenverhaltens sinnvoll ist.

## Literatur

- [1] Norm DIN 1319-1: Grundlagen der Messtechnik, Teil 1: Grundbegriffe. Berlin: Beuth-Verlag, 1995.
- [2] Norm DIN 19700: Stauanlagen. Berlin: Beuth-Verlag, 2004.
- [3] Wasserrechtsgesetz von Österreich, Bundesgesetzblatt 1959, Novellierung 1997.
- [4] Davison, A. C.; Hinkley, D.V.: Bootstrap Method and their Application. Cambridge: University Press, 1998.
- [5] Gebler, T.: Talsperrenüberwachung - Stand der Technik und Messdatenanalyse des österreichischen Hochwurtdammes. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, 2005 (unveröffentlicht).
- [6] Neuschitzer, F.: Elektronische Daten - Erfassung und Auswertung aus Sicht der Talsperrenüberwachung der KELAG, In: V. Mittweidaer Talsperrentag, 10.-11. Mai 2006.
- [7] Neuschitzer, F.: Überwachungs- und Sicherheitsbericht, KW Zirknitz, Sperre Hochwurten 2005, KELAG-Archiv, 2005 (unveröffentlicht).

Anschrift der Verfasser:

*Dipl.-Ing. Jörg Franke*

*Dipl.-Geökol. Jan Bliedernicht*

*Dipl.-Ing. Tobias Gebler*

*Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht*

Universität Stuttgart

Institut für Wasserbau

Pfaffenwaldring 61

D-70569 Stuttgart

joerg.franke@iws.uni-stuttgart.de

*Dipl.-Ing. Fritz Neuschitzer*

KELAG

Arnulfplatz 2

A-9020 Klagenfurt

fritz.neuschitzer@kelag.at

