

# **DIE ROLLE DER DATENANALYSE UND FOLGEN FÜR DAS MESSPROGRAMM FALLBEISPIEL: FLIEßZEITEN DES SICKERWASSERS AN EINEM MORÄNEN- SCHÜTTDAMM MIT INNENKERNDICHTUNG**

Dipl.-Ing. Jörg Franke, Dipl.-Geoökol. Jan Bliedernicht, Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht  
Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, D-70550 Stuttgart  
joerg.franke@iws.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Patrick Blank  
Ingenieurbüro Schneider, Dieselstraße 21, D-70839 Gerlingen  
pa.blank@gmx.de

Baumeister Dipl.-Ing. Fritz Neuschitzer  
Kärntner Elektrizitätsaktiengesellschaft, Arnulfplatz 2, A-9020 Klagenfurt  
fritz.neuschitzer@kelag.at

## **Kurzfassung**

Seit einigen Jahren werden Messstellen an Talsperren verstärkt mit Messtechnik für die automatisierte Datenerhebung und –übermittlung aufgerüstet. Die dadurch sehr umfangreiche Datenbasis steht nun zur vertieften statistischen Auswertung bereit. Für den 42 m hohen Freibachdamm im Süden Kärntens wird überprüft, ob das Datenmaterial Informationen zur Herkunft und zur Fließzeit des Sickerwassers bietet. Mittels dreier Varianten der Korrelationsanalyse wird diese Fragestellung im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht.

## **1 Freibachdamm**

### **1.1 Historie**

Die Kärntner Elektrizitätsaktiengesellschaft (KELAG), als 1947 verstaatlichtes Kärntner Elektrizitätsunternehmen, hat Ende der 1950er Jahre im Süden von Österreich eine im eigenen Haus entworfene und berechnete Kraftwerksanlage mit einer Ausbauleistung von 15 MW in den Karawanken, einem Grenzgebirge zu Slowenien, in den Jahren 1957 - 1959 errichtet (Abb. 1). Die geografische Nähe zu Klagenfurt war entscheidend, dass das Wasserkraftpotential des Freibaches durch Errichten eines Stausees genutzt werden sollte. Aufgrund der geologischen Untergrundverhältnisse war zur damaligen Zeit nur der Bau eines 42 m hohen Schüttdammes möglich.

Der 5,2 Mio. m<sup>3</sup> große Speicher wird aus einem 42 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet, sowie durch eine 2006 wieder aktivierte 5 MW Pumpe aus der Drauf gefüllt. Die Anlage dient zur Spitzenstromabdeckung.

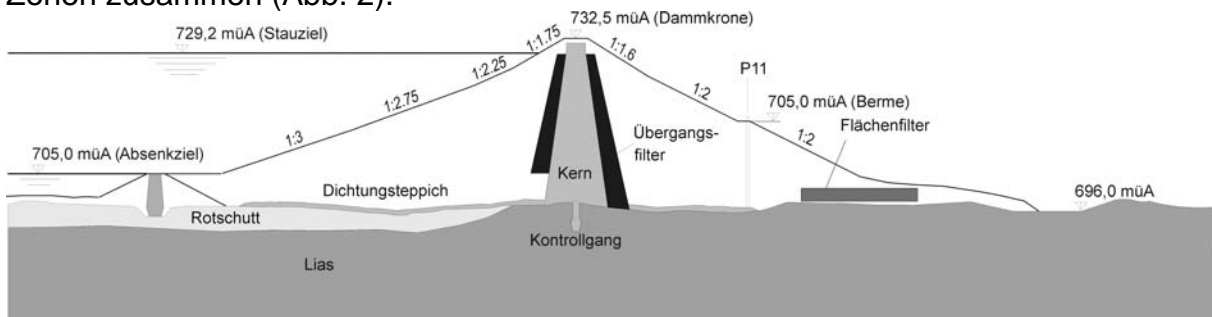


**Abb. 1:** Freibachdamme

### 1.2 Dammaufbau

Zum besseren Verständnis der Mess- und Überwachungssysteme ist eine Erläuterung des Damm- und Untergrundaufbaues von Bedeutung.

Der Schüttdamm mit einem Volumen von 235.000 m<sup>3</sup> setzt sich aus verschiedenen Zonen zusammen (Abb. 2).



**Abb. 2:** Längsschnitt des Dammes senkrecht zur Dammachse durch P11

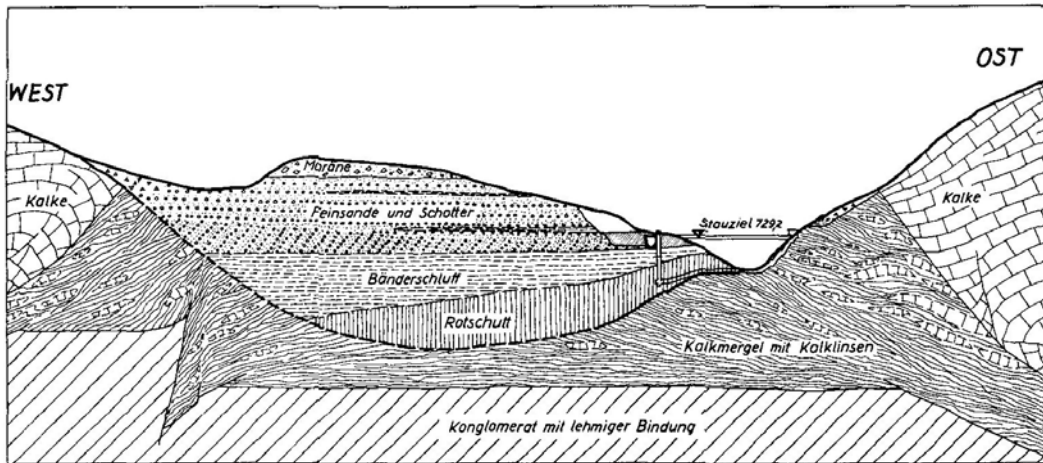
Der Dichtungskern aus abgesiebtem und mit Bentonit vergütetem Hangschuttmaterial ist am Fuß 14,0 m stark und verjüngt sich beidseitig mit der Neigung 1:7 auf 4,0 m bis zur Dammkrone. An den Kern schließt eine Übergangsschicht, bestehend aus Schottermaterial 0/100 und Filterschichten aus abgesiebtem Material 100/300 und 10/100 als Stufenfilter, an. Der Stützkörper aus Hangschuttmaterial 0/500 hat ein Schüttvolumen von 144.000 m<sup>3</sup>. Bei einer Schütteleistung von ca. 12.000 m<sup>3</sup> pro Woche konnte der Damm von Mai bis Ende Oktober 1958 innerhalb eines Sommers erstellt werden.

### 1.3 Abdichtungsmaßnahmen

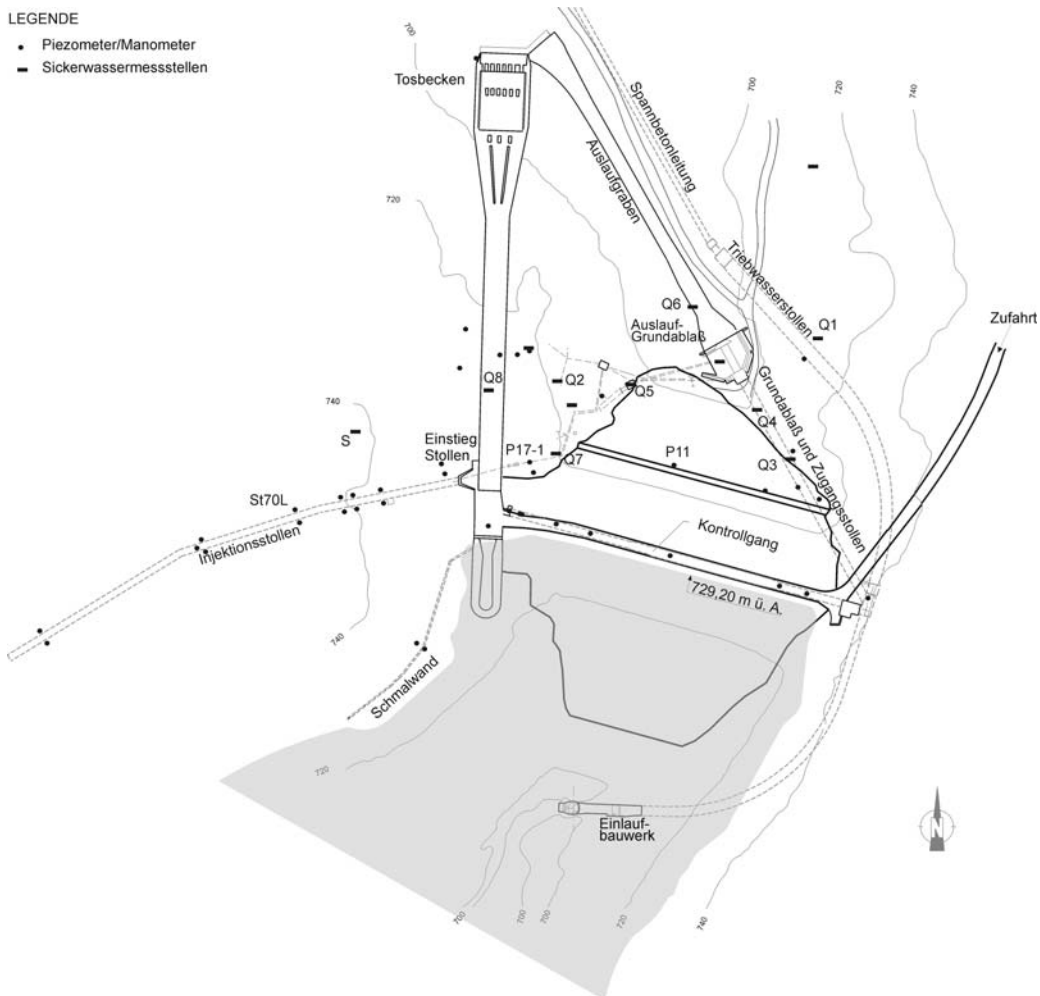
An der östlichen Flanke und unter dem Dichtungskern ist ein Kontrollgang in den Lias-Mergeluntergrund eingebunden. Im westlichen Bereich befindet sich eine bergmännisch eingebrachte Betondichtung, um grobdurchlässiges Bergsturzmaterial (Rotschutt) entsprechend abzudichten (Abb. 3).

Durch Erkundungsbohrungen und -stollen waren die Untergrundverhältnisse für die konzipierenden Abdichtungsarbeiten gut aufgeschlossen. Bedingt durch die letzte

Eiszeit wurde der Talweg durch Ablagerungen an der westlichen Flanke des Freibachtales verlegt und der Freibach Richtung Osten verdrängt (Abb. 3). Die Dichtheit dieser Schotter- und Bänderschluflwechsellagerungen wurde jedoch überschätzt. Schon bald nach dem ersten Aufstau zeigten sich ab einer Stauhöhe von 720 Meter über Adria (m ü. A.) am westlichen Hang luftseitig des Dammes Wasseraustritte. Daher wurde von einem 200 m langen Injektionsstollen aus (Abb. 4) die Flanke abgedichtet, und der vorgesehene Vollstau ermöglicht.



**Abb. 3:** Geologischer Schnitt im Bereich der Dammachse [5]



**Abb. 4:** Lageplan des Freibachdammes mit Messstellen; im Text genannte Messpunkte sind bezeichnet

Nachdem es in den 1980er Jahren zu einer Erhöhung der Sickerwasserabflüsse aus dem westlichen Bereich kam, wurde 1985 im Bereich des Hochwasserentlastungsgerinnes mit Injektionen eine zusätzliche Abdichtung vorgenommen. Als weitere Maßnahme zur Verlängerung des Sickerwasserweges, entschloss sich die KELAG 1986 zusätzlich zu den Injektionen an den Einlauftrug der HW-Entlastung eine 145 m lange Schmalwand vom Stauziel aus mit einer maximalen Tiefe von 20 m anzuschließen (Abb. 4).

#### 1.4 Die Messeinrichtungen

Die komplexen geologischen Untergrundverhältnisse (Abb. 3) werden mit einem umfangreichen Messprogramm (Abb. 4) überwacht. Die Lage ausgewählter Messstellen in Bezug auf die Anbindung an die unterschiedlichen geologischen Schichten ist in Tab. 1 zusammengestellt.

**Tab. 1:** Erläuterungen zu ausgewählten Messstellen

Messpunkt	Erläuterung
Q5	Sickerwasserabfluss aus dem Rotschutthorizont (West)
Q2, Q7, Q8	Sickerwasserabflüsse aus den oberen Schotterschichten (West)
Q3, Q4, Q6	Sickerwasserabflüsse aus dem Flächenfilter an der Luftseite der Dammaufstandsfläche
S	Bergwasserspiegel etwa 20 m oberhalb des Stauziels in Verlängerung der Dammachse (West)
St70L	Piezometerstand im Injektionsstollen hinter dem Dichtschirm (West)
P17-1	Piezometerstand an der Schichtgrenze von Schotter/Sand zu Bänderschlufl (West), Luftseite

Die Sickerwässer werden größtenteils automatisch gemessen und in die Energieleitzentrale sowie ins Intranet der KELAG übertragen, wo die Daten der letzten 20 Tage mit einem stündlichen Update für die Sperre zeitabhängig dargestellt sind. Eine Automatisierung der restlichen Messwehre ist projektiert, da eine vollständige Online-Überwachung des Dammes angestrebt wird. Regelmäßige Kontrollgänge und manuelle Messungen vor Ort dienen der zusätzlichen Überprüfung der Messdaten. Die manuellen Werte sind in den im Onlinesystem abrufbaren Grafiken eigens mit Symbolen hervorgehoben.

#### 2 Ermittlung der Fließzeit des Sickerwassers

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse wird der Zusammenhang zwischen Einwirkungen und Reaktionen im Talsperrenkörper ermittelt. Als Einwirkungen werden sowohl der Stauspiegel als auch der Niederschlag herangezogen, als Reaktionen die Sickerwasserabflüsse und die Grundwasserstände. Zum Beispiel kann mit einer Korrelationsanalyse die Fließzeit zwischen zwei Messstationen geschätzt werden, indem zwei Beobachtungsreihen zeitlich zueinander verschoben werden und die Korrelation der beiden Größen für allmählich größer werdende Zeitabstände ermittelt wird. Der Zeitabstand, an dem die Korrelation maximal ist, weist auf die mittlere Fließzeit des Sickerwassers zwischen den beiden Messstationen hin.

## 2.1 Vorprüfung der Daten

Bevor die Messdaten ausgewertet werden können, wird zunächst ein Zeitraum festgelegt, in dem möglichst für alle Messstationen Beobachtungen vorliegen. Durch die zum Teil sukzessive Aufrüstung von Talsperren mit automatisierten Messgeräten, kann beispielsweise ein erst spät installiertes Niederschlagsmessgerät einen stark limitierenden Faktor auf die Auswertung darstellen [2]. In dieser Untersuchung werden Online-Werte, die bei Änderungen im Drei-Sekundenabstand gespeichert werden, auf stündliche Werte reduziert. Für sechs Sickerwassermessstellen liegen digitale Online-Messwerte für den Zeitraum von Mai 1997 bis Dezember 2005 vor. Bei zehn Piezometern sind die Aufzeichnungen etwas kürzer und beginnen im November 2001. Die Daten zur Stauspiegelhöhe und zum Niederschlag sind für den gesamten Zeitraum verfügbar. Neben den automatisierten Messdaten liegen auch manuelle Messungen von weit mehr Messstellen vor.

Steht der Auswertez Zeitraum fest, muss sichergestellt werden, dass die Messdaten frei von Messfehlern sind, da diese eine Berechnung verzerren. Die Datenbasis der KELAG für den Freibachdamm erfordert hier keinen größeren Eingriff.

Neben der Plausibilitätsprüfung werden die Daten auch mit einer Doppelsummenanalyse und einer Trendbestimmung auf Homogenität hin untersucht. Es lässt sich feststellen, dass die Quelle Q2 zu versiegen beginnt und die – momentan noch nicht automatisierte – Quelle Q8 stärker schüttet als in der Vergangenheit.

## 2.2 Varianten der Korrelationsanalyse

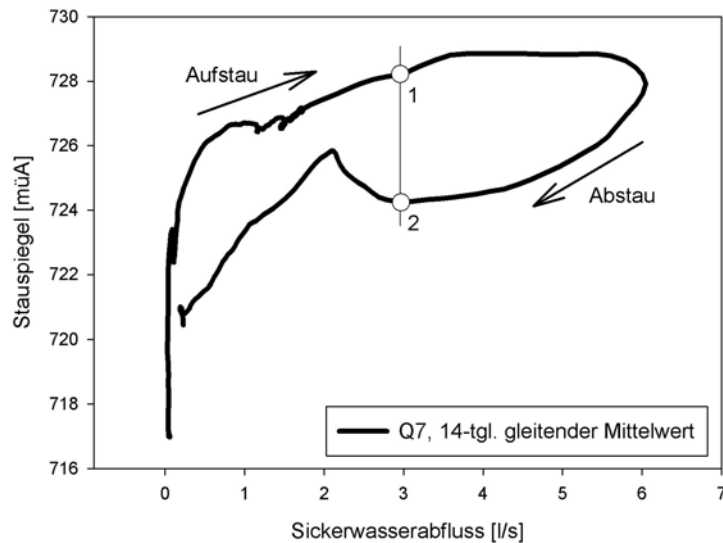
Der Zusammenhang zweier Messgrößen kann bestimmt werden, in dem der Korrelationskoeffizient  $r$  der Zeitreihen beider Größen berechnet wird [3]:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (x(t) - x_m) \cdot (y(t) - y_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x(t) - x_m)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (y(t) - y_m)^2}} \quad (\text{Gl. 1})$$

In dieser Untersuchung ist  $x(t)$  der Messwert der Einwirkung (Stauspiegelhöhe oder Niederschlag) zum Zeitpunkt  $t$  und  $y(t)$  der korrespondierende Messwert der Reaktion (Sickerwasserabfluss oder Grundwasserstand).  $x_m$  stellt den arithmetischen Mittelwert der Einwirkung und  $y_m$  den arithmetischen Mittelwert der Reaktion dar.  $n$  ist die Anzahl der gemeinsamen Messungen. Die Korrelation bestimmt den linearen Zusammenhang zwischen zwei Messgrößen. Ist der Korrelationskoeffizient 0, so besteht kein linearer Zusammenhang. Eine positive Korrelation bedeutet, dass die Erhöhung des Stauspiegels beispielsweise eine Zunahme des Sickerwasserabflusses oder die Erniedrigung des Stauspiegels eine Verringerung des Sickerwasserabflusses zur Folge hat.

Es zeigt sich, dass die Messgrößen durch die Bewirtschaftung des Speichers als Jahres- und Wochenspeicher eine deutliche Periodizität aufweisen. Zum Beispiel wird die jahresperiodische Schwankung deutlich, wenn beide Messgrößen gegeneinander aufgetragen, und die Messwerte, die zeitlich zusammenhängen, miteinander verbunden werden (Abb. 5). Es entsteht dann eine Hystereseschleife deren aufsteigender Ast die Phase der Speicherbefüllung und deren absteigender Ast die Phase der Speicherentleerung beschreibt. In der Aufstauphase (Punkt 1) wird beispielsweise am Messpunkt Q7 ein Sickerwasserabfluss von 3 l/s bei etwa 728 müA erreicht, während der Abstauphase (Punkt 2) fließt derselbe Sickerwasserabfluss bei etwa

724 müA. Da ein starker zeitlicher Zusammenhang zwischen den Messwerten besteht, ist es daher nicht sinnvoll die absoluten Werte für die Korrelationsanalyse zu verwenden.

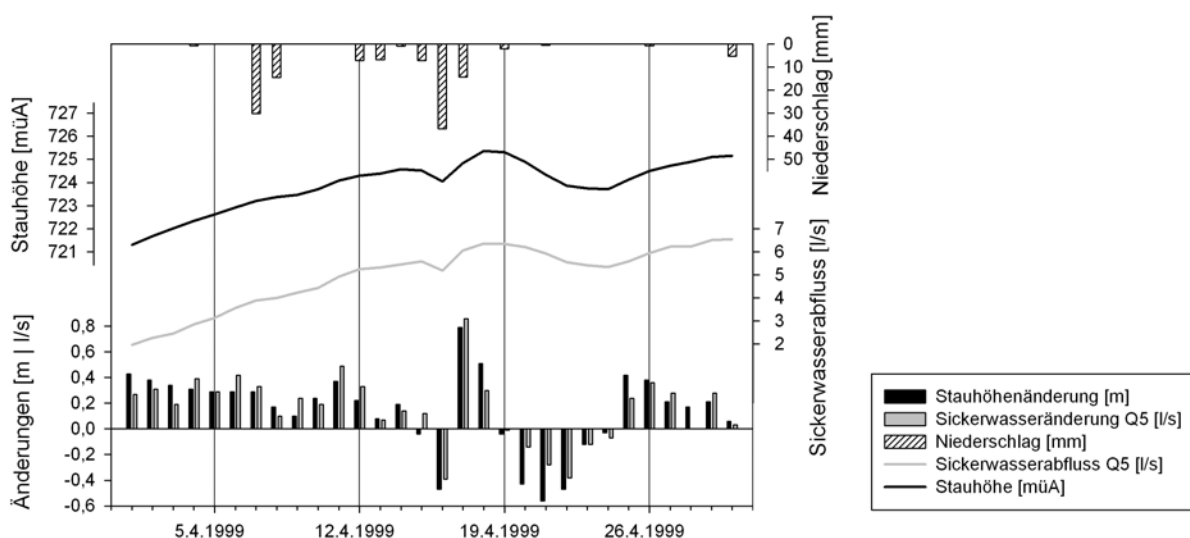


**Abb. 5:** Jahrgang von März 2000 bis Februar 2001: gleitender Mittelwert des Sickerwasserabflusses Q7 zur Stauspiegelhöhe

Damit die jahresperiodischen Schwankungen nicht in die Korrelationsanalyse mit einfließen, werden die zeitlichen Änderungen der Einwirkung und der Reaktion verwendet (Gl. 2).

$$\Delta x(t) = x(t) - x(t-1) \text{ und } \Delta y(t) = y(t) - y(t-1) \quad (\text{Gl. 2})$$

$\Delta x(t)$  ist die zeitliche Änderung der Stauspiegelhöhe, und  $\Delta y(t)$  ist die zeitliche Änderung des Sickerwasserabflusses bzw. des Grundwasserstandes. Steigt z. B. die Stauspiegelhöhe an, so ist die Änderung der Stauspiegelhöhe von einem Tag zum nächsten positiv. Das hat zur Folge, dass der hydraulische Gradient zwischen den beiden Messstellen größer wird, wodurch der Sickerwasserabfluss ebenfalls zunimmt und die zeitliche Änderung dieser Größe ebenso positiv ist. Die zeitlichen Änderungen beider Größen sind beispielhaft in Abb. 6 dargestellt.



**Abb. 6:** Sickerwasserabfluss Q5, Stauhöhe, Niederschlag im April 1999, zeitliche Änderung des Sickerwasserabflusses Q5 und der Stauhöhe

Um den linearen Zusammenhang zwischen den zeitlichen Änderungen beider Messgrößen zu bestimmen, wird ebenfalls die Korrelation berechnet:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (\Delta x(t) - \Delta x_m) \cdot (\Delta y(t) - \Delta y_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (\Delta x(t) - \Delta x_m)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (\Delta y(t) - \Delta y_m)^2}} \quad (\text{Gl. 3})$$

$\Delta x_m$  ist der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Änderung der Stauspiegelhöhe, und  $\Delta y_m$  ist der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Änderung der Reaktion.

Die Korrelationsberechnungen nach Gleichung 1 und 3 haben den Nachteil, dass sie gegen „Ausreißer“ bei den Messdaten weniger robust sind. Da die Verteilung der zeitlichen Änderungen beider Größen asymmetrisch ist, kann dieser Effekt eine Rolle spielen. Um eine robustere Schätzung zu erzielen, wird für jeden Zeitpunkt der Rang der zeitlichen Änderung einer Größe bestimmt. Es wird dann die Korrelation der Ränge berechnet:

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (R_i(t) - R_{i,m}) \cdot (R_j(t) - R_{j,m})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (R_i(t) - R_{i,m})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (R_j(t) - R_{j,m})^2}} \quad (\text{Gl. 4})$$

$R_i(t)$  ist der Rang der zeitlichen Änderung der Stauspiegelhöhe und  $R_j(t)$  der korrespondierende Rang der Reaktion.  $R_{i,m}$  und  $R_{j,m}$  sind die arithmetischen Mittelwerte beider Größen.

### 2.3 Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Die als Stundenwerte vorliegenden Daten werden für die Berechnungen als Tageswerte aggregiert.

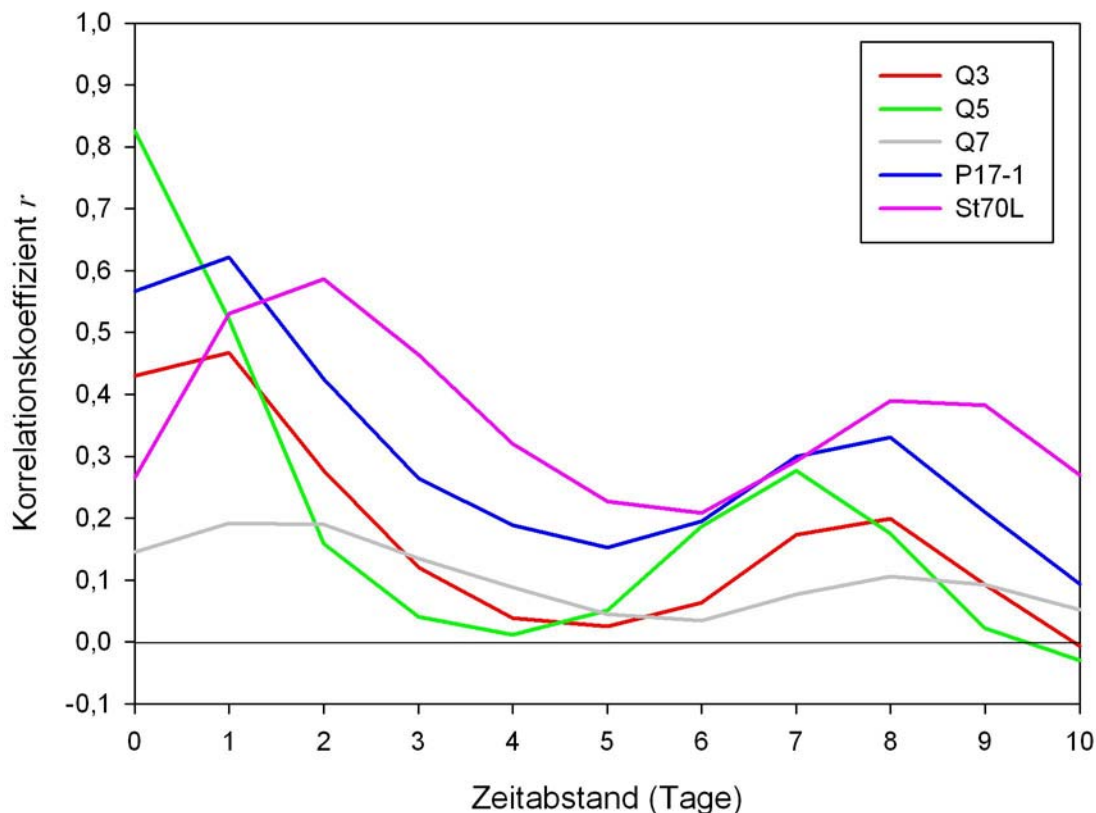
Es ist zu erkennen, dass die Korrelationsanalyse mit Absolutwerten nach Gl. 1 keine Aussage für die Fließzeiten liefert, da ein Maximum nicht eindeutig bestimmbar ist (Tab. 2). Hingegen zeigen die beiden anderen Varianten plausible Ergebnisse, wobei diejenige Variante, die die Ränge verwendet (Gl. 4) das Resultat noch ein wenig strafft.

**Tab. 2:** Vergleich der verschiedenen Korrelationsverfahren für die Quelle Q5, dargestellt ist der Korrelationskoeffizient  $r$

Zeitabstand (Tage)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variante (Gl. 1)	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82
Variante (Gl. 3)	0,75	0,47	0,14	0,02	0,00	0,05	0,17	0,21	0,13	0,04
Variante (Gl. 4)	0,83	0,52	0,16	0,04	0,01	0,05	0,19	0,28	0,18	0,02

Ein Teil der Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Gl. 4 ist in Abb. 7 zusammengestellt. Zu erkennen sind die unterschiedlichen Charakteristiken der verschiedenen Messstellen als Reaktion auf die Änderung des Stauspiegels.





**Abb. 7:** Korrelationskoeffizienten  $r$  der Ränge der zeitlichen Änderungen (Gl. 4) mit der Stauspiegelhöhe als Einwirkung sowie mit den Sickerwasserabflüssen und Grundwasserständen als Reaktion für einen 24-Stunden Zeitabstand

Zunächst fällt in Abb. 7 der ausgeprägte Wochengang auf. Der Sickerwasserabfluss der Messstelle Q5 beispielsweise reagiert sofort auf eine Änderung der Stauspiegelhöhe, was aus visueller Sichtung der Daten schon erkennbar ist (Abb. 6). Daher ist die Korrelation am höchsten, wenn kein Zeitabstand zwischen den Zeitreihen beider Messstellen besteht. Der bewirtschaftungsseitig induzierte Wochengang lässt sich daraus ablesen, dass die Korrelation nach sieben Tagen ein zweites Maximum erreicht.

Im Vergleich dazu springt der Sickerwasserabfluss der Messstation Q3 etwas später, um einen Tag versetzt, an. Die Korrelation ist dabei auch nicht so stark ausgeprägt. Die Quelle Q7 ist noch weniger abhängig von der Stauspiegelhöhe.

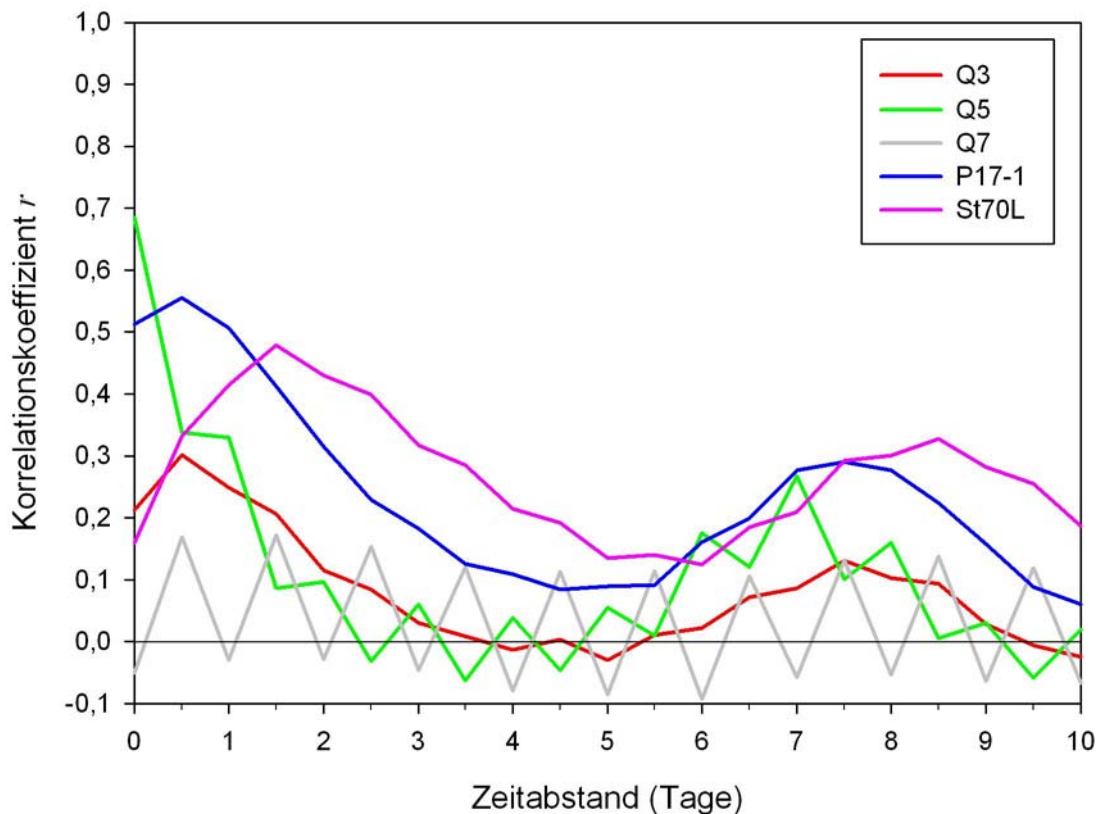
Von den in Abb. 6 dargestellten Piezometern zeigt P17-1 einen Tag nach der Änderung des Stauspiegels einen Ausschlag, die hinter dem Injektionsschleier platzierte Messstelle St70L noch einen Tag später.

Ebenso ist ein Ergebnis der Berechnungen, dass die Sickerwassermessstelle Q3 und das Piezometer P17-1, obwohl sie nicht nah beieinander eingebaut sind, die gleiche Reaktion auf eine Stauspiegeländerung aufweisen.

Die vorliegenden stündlichen Messwerte sind für die Berechnungen auf Tageswerte aggregiert. Um zu überprüfen, ob dieser Zeitabstand nicht zu groß ist, werden begleitende Berechnungen mit stündlichen, 6-stündlichen und 12-stündlichen Datensätzen angestellt, die jedoch keine Verbesserung der Informationen aufzeigen. Werden zum Beispiel die 12-stündlichen Daten verwendet (Abb. 8) so nimmt die Korrelation ab. Zudem wird ein bewirtschaftungsseitig aufgeprägter Tagesgang sichtbar. Die Maxi-



ma der Korrelation weisen einen zumeist ähnlichen Zeitabstand auf wie bei den täglichen Änderungen, ebenso bleibt der Wochengang erhalten. Es hat sich herausgestellt, dass die Änderungen der Einwirkungen und Reaktionen eine gewisse minimale Größe besitzen müssen, um bei den Korrelationsberechnungen eine Auswirkung zu zeigen. Bei Verwendung der Änderungen von 6-stündlichen oder stündlichen Messdaten ist dies, neben dem verstärkten Einfluss der Messungenauigkeit, nicht gegeben. Tageswerte erweisen sich durch die Mittelung des Tagesgangs als am aussagekräftigsten.



**Abb. 8:** Korrelationskoeffizienten  $r$  der Ränge der zeitlichen Änderungen (Gl. 4) mit der Stauspiegelhöhe als Einwirkung sowie mit den Sickerwasserabflüssen und Grundwasserständen als Reaktion für einen 12-Stunden Zeitabstand

Es zeigt sich, dass der Niederschlag als Einwirkung nur geringen Einfluss auf die Sickerwasserabflüsse und Grundwasserstände hat. Dies kann daran liegen, dass der Niederschlag nur eine Einflussgröße des Systems von mehreren darstellt. Neben dem Niederschlag haben vor allem auch der Zufluss des Freibaches, die Schneeschmelze im Frühjahr und das Turbinieren bzw. Pumpen des Wassers im Kraftwerk Freibach einen Einfluss auf den Stauspiegel und damit auf die Sickerwassermessstellen und Piezometer.

### 3 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Studie wird eine Methode vorgestellt, mit der die Fließzeit des Sickerwassers für einen Moränen-Schüttdamm ermittelt wird und die Rückschlüsse auf die Durchströmung zulässt. Es kann festgestellt werden, dass eine Korrelationsanalyse mit Absolutwerten aufgrund der starken Periodizität der Messgröße keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Ein alternatives Verfahren, das die zeitlichen Änderungen von Messgrößen verwendet, liefert deutlich realistischere Resultate. Die Ergebnisse aus der Korrelationsanalyse erweitern zusätzlich zur visuellen Betrachtung der Gang-

linien von Messgrößen das Verständnis des Einwirkungs-Reaktions-Systems „Talsperre“.

Die Verwendung von stündlichen Messdaten ist für die Beurteilung der aktuellen Sicherheit am Bauwerk sinnvoll – und für die Dokumentation der Historie von Bedeutung. Im Rahmen dieser Studie zeigt es sich jedoch, dass eine zeitlich hohe Auflösung einer Messgröße nicht automatisch einen höheren Informationsgrad aufweisen muss. Die täglich gemittelte Information liefert hier die besten Ergebnisse.

Für den Freibachdamm wäre es aufschlussreich, wenn der Bergwassereinfluss luftseitig des Injektionsstollens im Brunnen S automatisch erfasst werden würde, da er vom Stauspiegel größtenteils unbeeinflusst ist. Mit den manuellen Messwerten von S können bislang noch keine vertieften Berechnungen angestellt werden. Ebenso wäre dafür eine Automatisierung der restlichen Messwehre für weitere Analysen vorteilhaft, um sämtliche Sickerwässer der Sperre online zu erfassen.

## Literatur

- [1] Blank, P.: Mathematisch-statistische Messdatenanalyse des österreichischen Freibachdamms. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, 2007 (unveröffentlicht).
- [2] Franke, J., Bliedernicht, J., Gebler, T., Neuschitzer, F. und Wieprecht, S.: Elektronische Messdaten – statistische Analysen bei einem Staudamm mit Asphaltoberflächendichtung. Wasserwirtschaft 1/2-2007, S. 21-24.
- [3] Hartung, J.: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, Oldenbourg Verlag, 2005.
- [4] Neuschitzer, F.: Überwachungs- und Sicherheitsbericht, KW Freibach, Sperre Freibach 2006, KELAG-Archiv, 2006 (unveröffentlicht).
- [5] Orel, A.: Gesteuerte Dichtungsarbeiten beim Erddamm des Freibachkraftwerkes Kärnten, Die Talsperren Österreichs Heft 13, Schriftenreihe der österreichischen Staubeckenkommission und dem österreichischen Wasserwirtschaftsverband Wien, Selbstverlag des österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes, Wien, 1964.