

Jörg Franke, Jan Bliefernicht, Patrick Blank, Fritz Neuschitzer und Silke Wieprecht

Elektronische Messdaten – Korrelationsanalysen zur Reaktionszeitermittlung des Sickerwassers an einem Dammbauwerk mit Innendichtung

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 wurde mittels dreier Varianten der Korrelationsanalyse überprüft, ob aus dem Datenmaterial Informationen zur Herkunft und zur Fließzeit des Sickerwassers gewonnen werden können.

1 Freibachdamm

Die Kärntner Elektrizitätsaktiengesellschaft (KELAG) 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 errichtet. Der 5,2 Mio. m³ große Speicher mit einem 42 m hohen Dammbauwerk wird aus einem 44 km² großen Einzugsgebiet sowie durch eine 2006 wieder aktivierte 5-MW-Pumpe aus der Drauf gefüllt. Die Anlage dient im Wesentlichen zur Spitzenstromabdeckung.

Der Schüttdamm mit einem Volumen von 235 000 m³ setzt sich aus verschiedenen Zonen zusammen. Der Dichtungskern aus abgesiebttem und mit Bentonit vergütetem Hangschuttmaterial ist am Fuß 14,0 m stark und verjüngt sich auf 4,0 m bis zur Dammkrone. Der Stützkörper aus Hangschuttmaterial hat ein Schüttvolumen von 144 000 m³ und schließt mit Übergangsschichten an den Kern an.

Bedingt durch die letzte Eiszeit wurde der Talweg durch Ablagerungen an der westlichen Flanke des Freibachtales verlegt und der Freibach Richtung Osten verdrängt. Die Dichtheit dieser Schotter- und Bänderschluflwechsellagerungen wurde anfangs überschätzt. Daher wurden von den Kontrollgängen und einem 200 m langen Injektionsstollen aus (Bild 1) im Laufe der Jahre immer wieder Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt und damit der vorgesehene Vollstau ermöglicht.

Die komplexen geologischen Untergrundverhältnisse werden mit einem umfangreichen Messprogramm (Bild 1) über-

wacht. In diesem Beitrag werden die Datensätze von acht Messstellen betrachtet:

- die Sickerwassermessstelle Q3, die auch aus dem Flächenfilter an der Luftseite der Dammaufstandsfläche gespeist wird,
- Q5, verbunden mit dem Rotschutthorizont im Westen,
- Q2, Q7 und Q8, die aus den oberen Schotter-schichten in der westlichen Flanke beschickt werden,
- die Messstelle S, die für den Bergwasserspiegel etwa 20 m oberhalb des Stauziels in Verlängerung der Dammmache im Westen steht, und
- die Piezometermessstellen im Injektionsstollen hinter dem Dichtungskern (St70L) und an der Schichtgrenze von Schotter/Sand zu Bänderschlufl an der Luftseite des Dammbaus (P17-1).

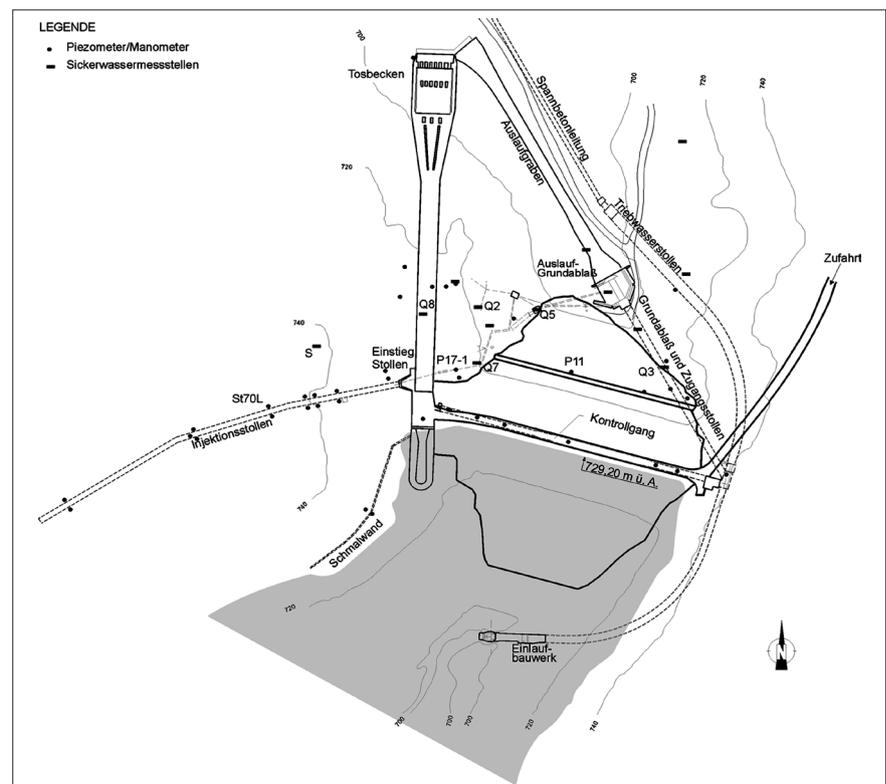


Bild 1: Lageplan des Freibachdammbaus mit Messstellen (im Text genannte Messpunkte sind bezeichnet)

2 Ermittlung der Reaktionszeit des Sickerwassers

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse wurde der Zusammenhang zwischen Einwirkungen und Reaktionen im Talsperrenkörper untersucht. Als Einwirkung wird in diesem Beitrag der Stauspiegel herangezogen, als Reaktionen die Sickerwasserabflüsse und die Grundwasserstände. Zum Beispiel kann mit einer Korrelationsanalyse die Reaktionszeit zwischen zwei in Fließrichtung hintereinander liegenden 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 Reaktionszeit des Sickerwassers zwischen den beiden Messstationen hin.

2.1 Vorprüfung der Daten

Bevor die Messdaten ausgewertet werden könnten, wurde zunächst ein Zeitraum festgelegt, in dem möglichst für alle Messstationen

Beobachtungen vorliegen. Für sechs Sickerwassermessstellen lagen digitale Online-Messwerte für den Zeitraum von Mai 1997 bis Dezember 2005 vor. Bei zehn Piezometern waren die Aufzeichnungen etwas kürzer und begannen im November 2001. Die Stauspiegellhöhe und der Niederschlag waren für den gesamten Zeitraum verfügbar. Neben den automatisierten Messdaten lagen auch manuelle Messungen weiterer Messstellen vor.

Nachdem der Auswertez Zeitraum fest stand, musste sichergestellt werden, dass die Messdaten frei von Messfehlern sind, da diese eine Berechnung verzerren.

Neben der Plausibilitätsprüfung wurden die Daten auch mit einer Doppelsummenanalyse und einer Trendbestimmung auf Homogenität hin untersucht. Es lies 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 Kor-

relationskoeffizient r der Zeitreihen beider Größen berechnet wird [3]:

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

In dieser Untersuchung ist $x(t)$ der Messwert der Einwirkung (Stauspiegellhöhe oder Niederschlag) zum Zeitpunkt t und $y(t)$ der korrespondierende Messwert der Reaktion (Sickerwasserabfluss oder Piezometerstand). 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 Absenkung des Stauspiegels eine Verringerung des Sickerwasserabflusses zur Folge hat.

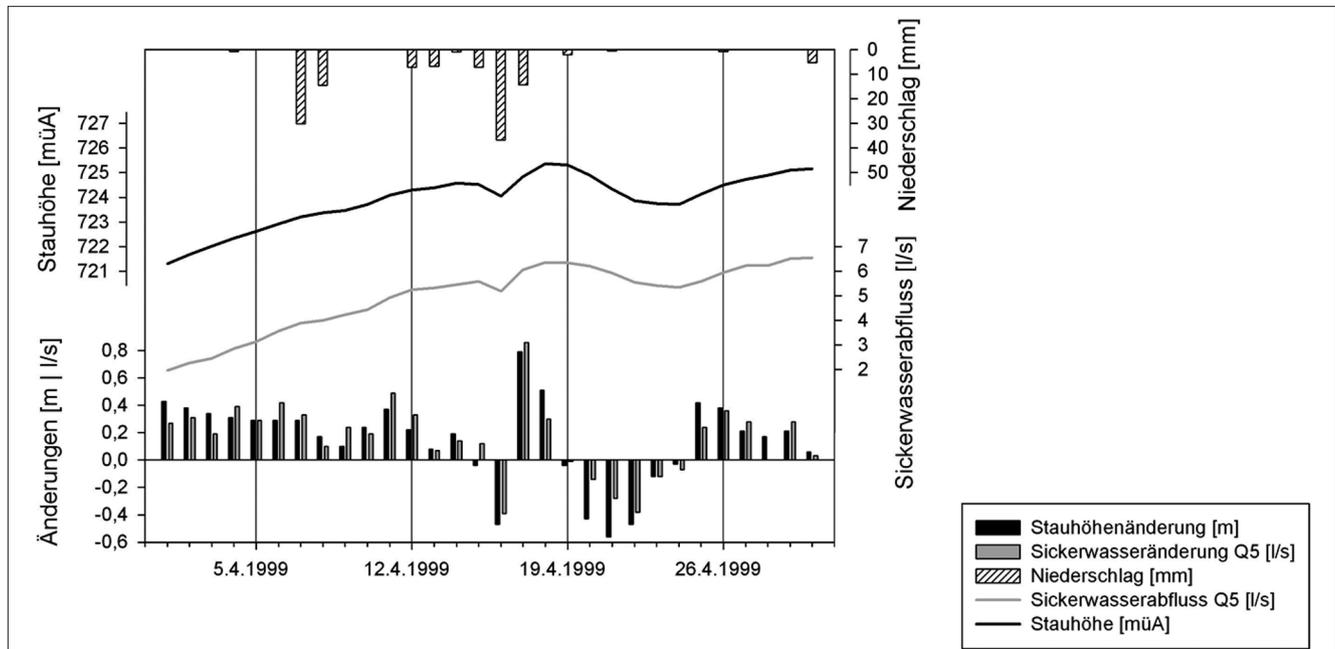


Bild 2: Sickerwasserabfluss Q5, Stauhöhe, Niederschlag im April 1999, zeitliche Änderung des Sickerwasserabflusses Q5 und der Stauhöhe

Tabelle 1: 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

Multibewusst



Es zeigt sich, dass die Messgrößen durch die Bewirtschaftung des Speichers als Jahres- und Wochenspeicher eine deutliche Periodizität aufweisen. Da ein starker zeitlicher Zusammenhang zwischen den Messwerten besteht, ist es daher nicht sinnvoll, die absoluten Werte für die Korrelationsanalyse zu verwenden. Es wurden daher die zeitlichen Änderungen der Einwirkung und der Reaktion verwendet:

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= x(t) - x(t-1) \text{ und} \\ \Delta y(t) &= y(t) - y(t-1) \end{aligned} \quad (2)$$

$\Delta x(t)$ 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. Die zeitlichen Änderungen der Stauspiegelhöhe und des Sickerwasserabflusses Q_5 sind beispielhaft in **Bild 2** dargestellt.

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

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

Δx_m ist der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Änderung der Stauspiegelhöhe und Δy_m ist der arithmetische Mittelwert der zeitlichen Änderung der Reaktion.

Die Korrelationsberechnungen nach Gl. (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:

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

$R_i(t)$ 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.

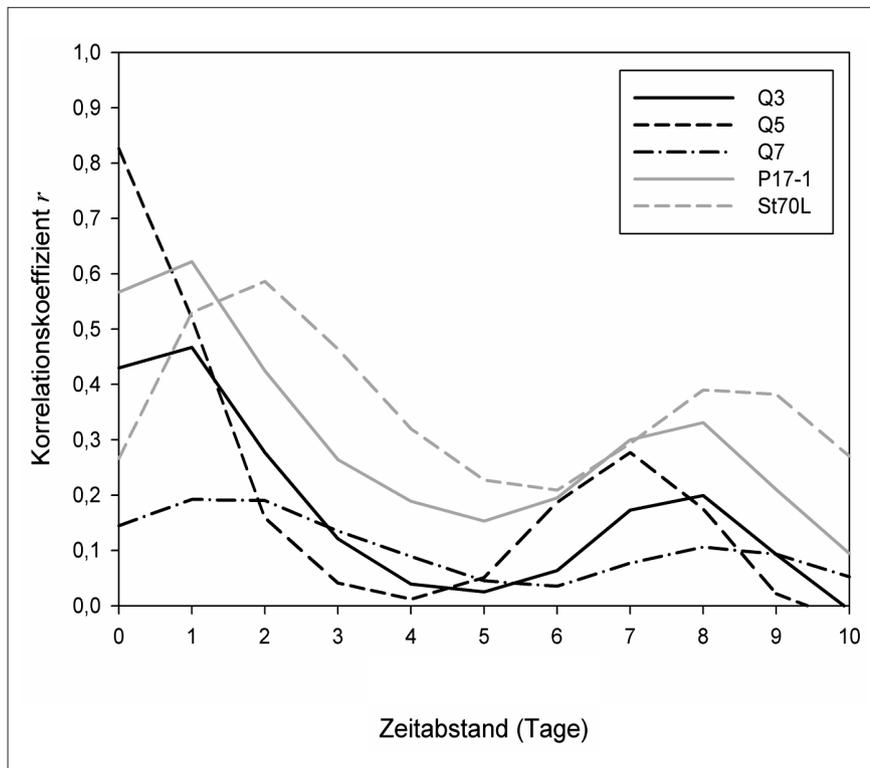


Bild 3: Korrelationskoeffizienten r der Ränge der zeitlichen Änderungen (Gl. 4) mit der Stauspiegelhöhe als Einwirkung sowie mit den Sickerwasserabflüssen und Piezometerständen als Reaktion für einen 24-Stunden-Zeitabstand

- ✓ 3 Basisfahrzeuge werden allen Ansprüchen gerecht: FUMO, M 26 und TREMO Carrier
- ✓ Kompakt und wendig, ideal für engste Einsatzbereiche
- ✓ Kraftvoller Geräteantrieb durch leistungsstarke Hydraulik
- ✓ Hohe Nutzlast
- ✓ Über 100 Einsatzmöglichkeiten durch wechselnde Auf- und Anbaugeräte

Entdecken Sie die **MultiUmweltfreundlichkeit**. Rufen Sie uns an.

Multicar, Zweigwerk der Hako-Werke GmbH
D-99880 Waltershausen · ☎+49 (0)3622-640-0
info@multicar.de · www.multicar.de



GaLaBau Nürnberg
17.-20.09.2008
Halle 9 Stand 209

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

Ein Teil der Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Gl. (4) ist in Bild 3 zusammengestellt. Zu erkennen sind die unterschiedlichen Charakteristiken der verschiedenen Messstellen als Reaktion auf die Änderung des Stauspiegels.

Zunächst fällt in Bild 3 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 (Bild 2). 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 Bild 3 dargestellten Piezometern zeigt P17-1 einen Tag nach der Änderung des Stauspiegels einen Ausschlag, die hinter dem Injektionsschleier platzierte Messstelle St70L noch einen weiteren 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- und 12-stündlichen Datensätzen angestellt, die jedoch keine Verbesserung der Informationen aufzeigen [6]. 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. Tageswerte erweisen sich durch die Mittelung des Tagesgangs als am aussagekräftigsten.

Jörg Franke, Jan Bliedernicht, Patrick Blank, Fritz Neuschitzer and Silke Wieprecht

Estimating the Reaction Time of Dam Seepage Water by Correlation Analysis

In the last few years, dam monitoring devices have been upgraded with automated acquisition and transmission of data. The generated data basis is now ready for subsequent statistical analysis. In the framework of this study, three different types of correlation analysis have been tested to estimate the reaction time of seepage water between two measuring points – between an impact (reservoir water level) and a reaction (seepage flows and piezometer levels). It has been shown, that daily absolute values cannot be used for this purpose. It has been found, that the use of the daily increments of the data, the changes from one day to the other, as calculation basis, delivers feasible results.

3 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Studie wird eine Methode vorgestellt, mit der die Reaktionszeit 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 Ganglinien 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.

Autoren

Dipl.-Ing. Jörg Franke
Dipl.-Geoökol. Jan Bliedernicht
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

Institut für Wasserbau der
Universität Stuttgart
70550 Stuttgart
joerg.franke@iws.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Patrick Blank

Ingenieurbüro Schneider
Dieselstraße 21
70839 Gerlingen
pa.blank@gmx.de

Baumeister Dipl.-Ing. Fritz Neuschitzer

Kärntner Elektrizitätsaktiengesellschaft
(KELAG)
Arnulfplatz 2
A-9020 Klagenfurt
fritz.neuschitzer@kelag.at

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.; Wieprecht, S.: Elektronische Messdaten – statistische Analysen bei einem Staudamm mit Asphaltoberflächendichtung. In: Wasserwirtschaft 97 (2007), Heft 1/2, 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. In: Schriftenreihe der österreichischen Stau- und Beckenkommission und dem österreichischen Wasserwirtschaftsverband Wien: Die Talsperren Österreichs, Heft 13, 1964.
- [6] Franke, J.; Bliedernicht, J.; Blank, P.; Neuschitzer, F.; Wieprecht, S.: Die Rolle der Datenanalyse und Folgen für das Messprogramm – Fallbeispiel: Fließzeiten des Sickerwassers an einem Moränenschüttdamm mit Innenkernendichtung. In: VI. Mittweidaer Talsperrentag, 23.-24. April 2008.