

Frank Roesler

Vertiefte Analyse der Messdaten an der Ennepestaumauer – 10 Jahre nach ihrer Sanierung

Bei der in den Jahren von 1997 bis 2002 sanierten Ennepestaumauer bestand in der Sanierungsgenehmigung unter anderem die Auflage zur Dokumentation des Sanierungserfolges durch eine Vertiefte Überprüfung 10 Jahre nach Sanierungsende. Im Rahmen der Vertieften Überprüfung wurden u. a. sämtliche, für die Standsicherheit relevanten Eingangsgrößen neu hinterfragt und bewertet. Von großer Bedeutung zur Beurteilung der Bauwerkssicherheit sind hierbei auch die vor Ort gewonnenen Messdaten, von deren vertiefter Regressionsanalyse hier berichtet wird.

1 Einführung

Die Ennepetalsperre, welche etwa 7 km südöstlich der Stadt Ennepetal und rund 14 km südwestlich von Hagen liegt, wurde zwischen 1902 und 1905 als Gewichtsstaumauer mit bogenförmigem Grundriss in Bruchsteinmauerwerk nach den von Otto Intze in Deutschland eingeführten Konstruktionsprinzipien erbaut.

Zur Vergrößerung des Stauvolumens von zunächst 10,3 Mio. m³ auf 12,6 Mio. m³ wurde die Staumauer bereits von 1911 bis 1912 um etwa 10 m auf dann 51 m über

Gründungssohle erhöht. Die eigentliche Stauerhöhung betrug hierbei nur 2,50 m, der Maueraufsatz dient als zusätzliches Gewicht zur Gewährleistung der Standsicherheit.

Anfang der 1980er Jahre wurden an der Staumauer Standsicherheitsdefizite festgestellt, die der damalige Eigentümer Ennepe-Wasserverband aufgrund begrenzter finanzieller Mittel nicht alleine beheben konnte, so dass zunächst nur das Stauziel vorläufig um 2,35 m abgesenkt wurde. Der Ruhrverband übernahm die Talsperre 1997 und begann mit der Sanie-

rung, welche bis zum Jahr 2002 andauerte. Das Sanierungskonzept beruhte auf der Auffahrung eines Kontroll- und Dränagestollens im Bereich der Sohlenfuge mittels einer Tunnelbohrmaschine. Von diesem Stollen aus wurden Dränagebohrungen zur Entwässerung des Mauerkörpers abgeteuft (**Bild 1**). Nach Abschluss der Sanierung konnte die ursprüngliche Stauhöhe wieder erreicht werden.

Aus der Zeit vor der Übernahme der Talsperre durch den Ruhrverband lagen kaum Messreihen vor. Der Hauptteil der Messeinrichtung wurde erst im Zuge der Sanierung installiert. Hierbei wurden seinerzeit aufgrund der nicht optimalen verkehrstechnischen Anbindung der Ennepetalsperre hauptsächlich automatische Messeinrichtungen ausgewählt, wobei zur Kontrolle der automatischen Messungen weiterhin manuelle Redundanzmessungen mit geringerer Messhäufigkeit dienen.

Zur geodätischen Überwachung der Ennepemauer dienen zwei jeweils aus Pendel- und Schwimmlothe bestehende Lotmessprofile sowie insgesamt 40 Objektpunkte der trigonometrischen Punktbestimmung. An den Loten wird jeweils automatisch (täglich) und manuell (monatlich) in radialer und tangentialer Richtung gemessen. Die Objektpunkte werden zusätzlich auch in vertikaler Richtung ausgewertet (1/2-jährlich).

Die Grundwasserstände an den seitlichen Hängen sowie im Vorland der Talsperre werden an insgesamt 16 Grundwas-

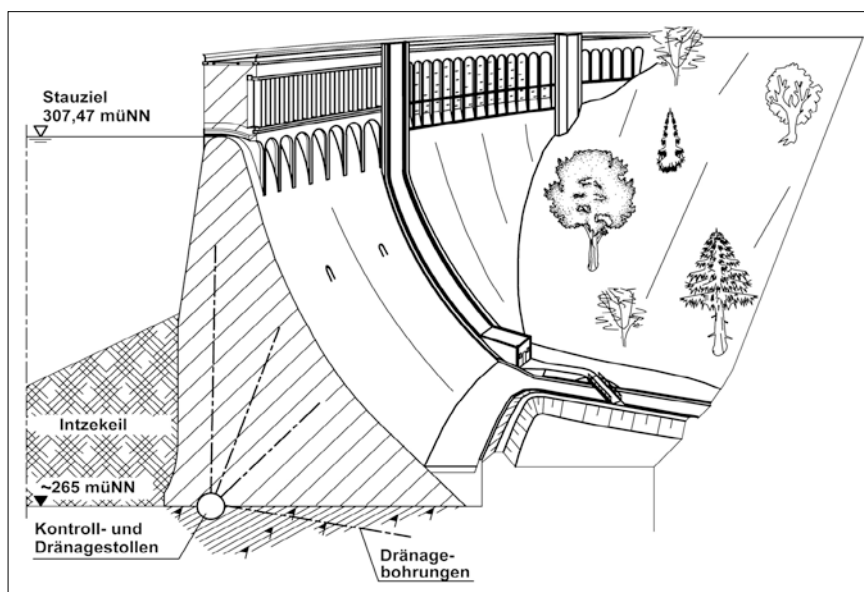


Bild 1: Querschnitt Ennepestaumauer mit Kontrollstollen und Drainagebohrungen

serpegeln überwacht. Sickerwassermengen aus den alten Drainageleitungen werden in den beiden Grundablassstollen mittels Gefäßmessung gemessen. Zur Erfassung der Sickerwassermengen wurden bei der Sanierung der Ennepestaumauer im Kontrollstollen drei automatische Messstellen mit Messwehren am rechten und linken Hang sowie in der Talsohle für die Summenmessung geschaffen. Neben der automatischen Messung erfolgt hier aus Redundanzgründen 14-tägig eine manuelle Ablesung. Die Überwachung des Porenwasserdrucks im Inneren der Staumauer erfolgt vom Kontrollstollen ausgehend in zwei Profilen, die nach einem Gewitterschaden im Jahr 1999 um jeweils unmittelbar benachbarte Bohrprofile ergänzt wurden, sowohl automatisch (täglich) als auch manuell (monatlich).

Weitere an der Ennepetalsperre vorhandene Messeinrichtungen werden hier näher betrachtet.

Bei der im Rahmen der Vertieften Überprüfung vorgenommenen Messdatenanalyse wird der Einfluss von Wirkgrößen, wie Stauhöhe, Temperatur oder Niederschlag, auf die jeweiligen Messgrößen mittels einer Regressionsanalyse untersucht. Nähere Angaben zur Verfahrensweise sowie dem statistischen Hintergrund sind beispielsweise in [1] zu finden.

Für eine von der Stauhöhe und Temperatur abhängige Verformung ergibt sich die lineare, in diesem Fall multiple Regressionsgleichung beispielsweise zu:

$$v \text{ [mm]} = x * \text{Stauhöhe [m ü. NN]} + y * \text{Temperatur [°C]} + b \quad (1)$$

Die Regressionskoeffizienten x , y und b werden dabei nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate so berechnet, dass sich eine möglichst gute Anpassung der Regressionsfunktion an die beobachteten Messwerte ergibt. Die Differenz zwischen den tatsächlichen Messwerten und den aus der Regressionsanalyse ermittelten wird als Residuum bezeichnet:

$$\text{Residuum} = \text{tatsächlicher Messwert} - \text{Regressionsergebnis} \quad (2)$$

Die Güte des Regressionsmodells wird mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes ρ^2 untersucht, wobei ein Maß nahe 1 einen starken Zusammenhang zwischen Modell und Messwerten anzeigt, während bei einem Maß nahe 0 kein Zusammenhang vorliegt. Des Weiteren werden die Signifikanz

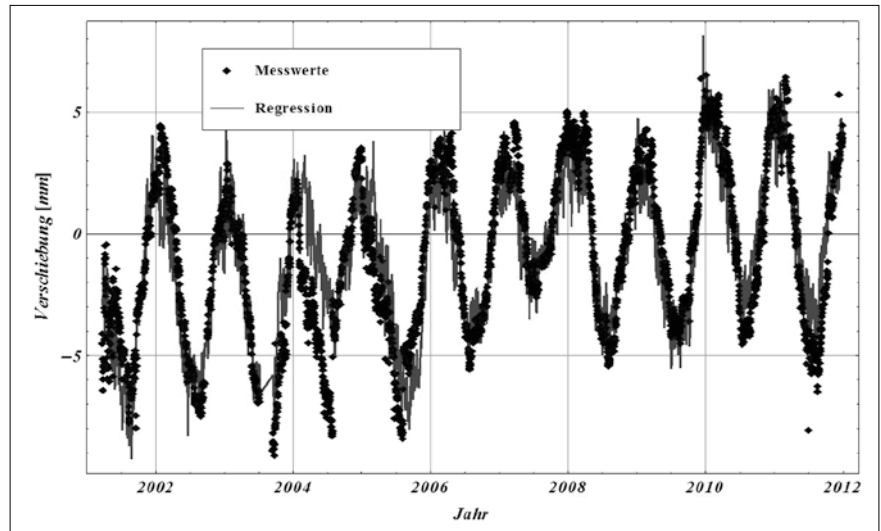


Bild 2: Messwerte und Regressionsergebnis für Pendellot F1 radial (automatische Ablesung)

des Bestimmtheitsmaßes mit dem F-Test und die Qualität der ermittelten Regressionskoeffizienten mit Hilfe der t-Verteilung analysiert.

Als maßgebende Wirkgrößen sind für die Ennepestaumauer die Stauhöhe im Hauptbecken, die Temperatur, die Niederschlagsmenge sowie die Abgabe aus der Talsperre zu nennen. Hierbei beeinflusst die Abgabe aus der Talsperre den Wasserstand im Tosbecken, welcher selbst nicht gemessen wird, aber zum Teil Auswirkungen auf Pegelwasserstände und Sickerwassermengen zeigt.

Die vier hier betrachteten Wirkgrößen sind mehr oder weniger stark bestimmten jährlichen Zyklen unterworfen. Trotzdem können sie als gegenseitig voneinander unabhängig und für die Regressionsberechnungen geeignet betrachtet werden. Beispielsweise weisen Stauhöhen und Temperaturen ihre extremalen Werte zu unterschiedlichen Jahreszeiten auf, da die Talsperre in der Regel im Frühjahr gut gefüllt ist und vergleichsweise niedrige Wasserstände im Herbst aufweist. Des Weiteren treten Abweichungen vom normalen Jahresgang an allen Wirkgrößen in unterschiedlichen Jahren auf. So erreichte die Talsperre zum Beispiel in den Frühjahren 2001 und 2009 nicht ihren gewohnten Füllungsstand und war in den Herbst 2004 und 2007 vergleichsweise wenig entleert. Die tiefsten Wintertemperaturen wurden hingegen in den Wintern 2002/03 und 2009/10 erreicht.

Recht unstet verlaufen die Niederschläge. Zur Verbesserung der Regression erfolgten die Berechnungen mit den 10-d-

Durchschnittsniederschlägen. Unabhängig von den vier bereits genannten Wirkgrößen wird die Zeit als weitere Wirkgröße eingeführt, um zeitliche Veränderungen der Messergebnisse berücksichtigen zu können.

2 Regressionsanalyse

Im Wesentlichen wurden im Rahmen der Analyse die vorhandenen Messdaten für den Zeitraum von der Sanierung bis zum 31.12.2011 ausgewertet. Zunächst werden die automatisch gemessenen Radialverschiebungen des Pendellotes F1 betrachtet, welche von den beiden Wirkgrößen Stauhöhe und Temperatur abhängen. Die Lotbewegungen nehmen einen erwarteten Verlauf mit luftseitigen Verschiebungen bei Temperatursenkungen und Wasserstandszunahmen ein. In den Anfangsjahren haben sich gewisse Störeinflüsse, z. B. durch Tropfenbildung oder Verschmutzungen auf der automatischen Ableseeinrichtung, ergeben, nach deren Beseitigung ab dem Jahr 2005 eine gute Übereinstimmung zwischen manueller und automatischer Ablesung festzustellen ist.

Die Regressionsgleichung der automatischen Messung am Pendellot F1 mit der Zeit in Jahren [a] seit dem ersten berücksichtigten Messwert am 22.03.2001 ermittelt sich zu:

$$V_{\text{F1p-aut}} \text{ [mm]} = 0,5830 * \text{Stauh. [m ü. NN]} - 0,2814 * \text{Temp. [°C]} + 0,3085 * \text{Zeit [a]} - 177,17 \quad (3)$$

Der Verlauf der Regression in Abhängigkeit von der Zeit sowie die einzelnen Messwerte sind in **Bild 2** dargestellt. Die Regressionsfunktion zeigt trotz der anfänglichen Ableseungenauigkeiten eine gute Annäherung der Messwerte, dies kommt auch durch ein Bestimmtheitsmaß von 0,78 und einen hohen F-Wert zum Ausdruck. Die t-Wert-Statistik belegt die Signifikanz der drei Wirkgrößen, wobei diese für die Temperatur, gefolgt von der Stauhöhe, am größten ist.

Die Betrachtung der Residuen (hier nicht dargestellt) zeigt, dass jahreszeitliche Effekte durch den Einfluss von Temperatur und Stauhöhe nicht vollständig erfasst werden. Im Frühjahr ergeben sich augenscheinlich größere Residuen als im Herbst. Dieses Verhalten lässt auf ein verzögertes Verformungsverhalten bei Temperaturänderungen schließen. Des Weiteren sind zunehmend negative Residuen bei Temperaturen unter 0 °C auffällig. Bei Frost scheint das Temperaturdehnungsverhalten der Staumauer gewissen Änderungen unterworfen zu sein.

Die Regressionsanalyse der manuellen Lotablesung liefert im Wesentlichen gleiche Ergebnisse. Aufgrund der nur bei der automatischen Messung vorhandenen anfänglichen Ableseungenauigkeiten ergibt sich jedoch ein etwas besseres Bestimmtheitsmaß von 0,88.

Die 40 Objektpunkte der trigonometrischen Punktbestimmung zeigen das erwartete Verhalten mit wasserseitigen Verschiebungen im Sommer und Verschiebungen zur Luftseite bei Stauerhöhungen. Die größten Verschiebungen erfährt hier

bei der in der obersten Reihe mittig gelegene Objektpunkt 4. Mit zunehmender Nähe zu den Widerlagern bzw. zur Gründung nehmen die Verschiebungsanteile betragsmäßig ab. Stau- und temperaturabhängige Verformungsanteile können mit den statistischen Parameter tests gut nachgewiesen werden. Dagegen fallen zeitabhängige Verschiebungsanteile deutlich geringer aus, sie liefern ebenso nur eine schlechte t-Wert-Statistik. Das Verschiebungsverhalten an der Ennepemauer ist somit hauptsächlich elastisch, da Verschiebungen aus Stauhöhenänderung und Temperatur reversibel sind. Zeitabhängiges, plastisches Kriechverhalten ist nicht bzw. nur sehr geringwertig zu beobachten.

Die Tangentialverschiebungen fallen deutlich geringer aus als die Radialverschiebungen und liegen zwischen -2 und +3 mm. Da die Werte mit einer Genauigkeit von 1 mm angegeben werden, ergibt sich ein recht unstetiger Verlauf der Messwerte. Es ist entsprechend schwierig, mit den statistischen Testparametern Abhängigkeiten von den Wirkgrößen nachzuweisen. Auffällig ist jedoch, dass sich im Bereich der Lotanlagen die Staumauer bei Temperaturerhöhungen tangential nach innen verschiebt.

Die Auswertung der Vertikalverformungen zeigt eine statistisch belegbare Abhängigkeit von der Stauhöhe. Mit zunehmender Stauhöhe erfahren die an der Luftseite montierten Objektpunkte eine reversible Setzung. Diese Setzungsanteile nehmen von der rechten Seite der Staumauer nach links hin zu. Dies deutet auf einen weniger nachgiebigen Untergrund

an der rechten Seite hin, wie er sich beim Auffahren des Kontrollstollens durch die hier angetroffene Schicht aus sehr festem Diabas auch bestätigt hat.

Hinsichtlich der Temperatur ist der statistische Zusammenhang nicht ganz so gut belegbar; es ist jedoch auffällig, dass die vertikalen Verformungsanteile deutlich geringer ausfallen. Daraus wird abgeleitet, dass es sich bei den staubedingten Verformungen hauptsächlich um eine Verkipfung (Rotation) handelt, während die temperaturbedingten Verformungen eher eine horizontale Verschiebung (Translation) darstellen. Das wirkgrößenabhängige Verformungsverhalten der Objektpunkte in Talmitte kann **Bild 3** entnommen werden.

Zwischen den Messergebnissen an den Objektpunkten und den beiden Lotanlagen kann insgesamt eine gute Übereinstimmung gefunden werden. Beide Messsysteme sind demnach geeignet, das tatsächliche Verschiebungsverhalten der Staumauer gut zu dokumentieren.

Beginnend mit den 16 Grundwasserpegeln werden als nächstes die geohydraulischen Messungen betrachtet. Erwartungsgemäß hängen die Wasserstände in den Pegeln hauptsächlich von Stauhöhe und Niederschlag ab. Die Niederschlagsabhängigkeit kann am linken Hang im statistischen Modell besser belegt werden, so dass dort die statistischen Testgrößen besser ausfallen. Bei den alten Pegeln in Talmitte tritt die Talsperrenabgabe als Ersatzwirkgröße für den nicht gemessenen Wasserstand im Tosbecken hinzu. An den Hängen ergeben sich die größten Steigungsmaße aus Stauhöhenänderungen an den etwas entfernt hinter der Staumauer befindlichen Messstellen. Dies indiziert, dass eine etwaige Um- bzw. Unterströmung weiträumiger stattfindet.

Hinsichtlich der Sickerwassermengen kann statistisch am besten die Abhängigkeit von der Wirkgröße Stauhöhe belegt werden. **Bild 4** zeigt für die Summenmessstelle S3, dass die Sickerwassermengen in der Regel nur schwach überproportional mit der Stauhöhe steigen und daher mit dem linearen Regressionsmodell ausreichend gut abgebildet werden können. Das vorgefundene Verhalten deutet auf homogene Verhältnisse hin. Eine Regressionsanalyse der Messwerte der Sickerwassermengensmessstellen S1 bis S3 wurde ebenso bereits im Abschlussbericht zum Probestau der Ennepetalsperre vom November 2002 durchgeführt. Damals ist

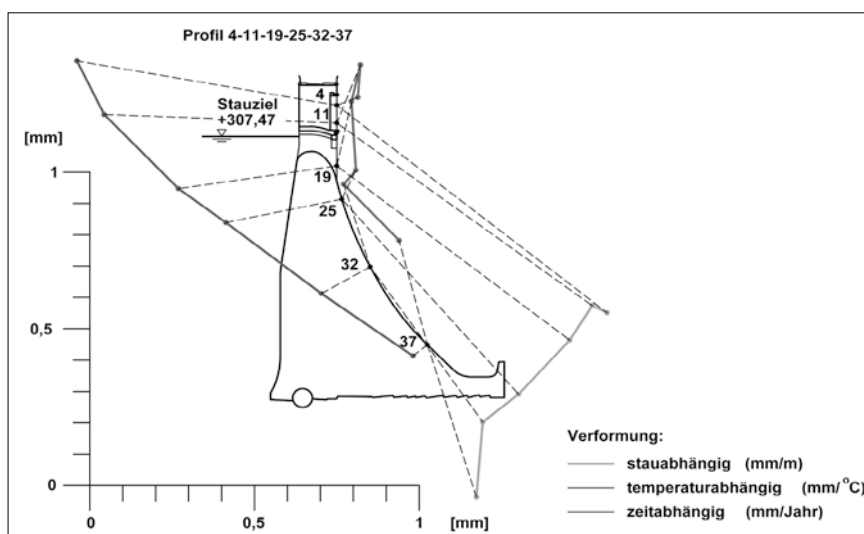


Bild 3: Querschnitt in Talmitte mit überhöhter Darstellung der Steigungsmaße für die Verformungen der Objektpunkte aus der Regressionsgleichung

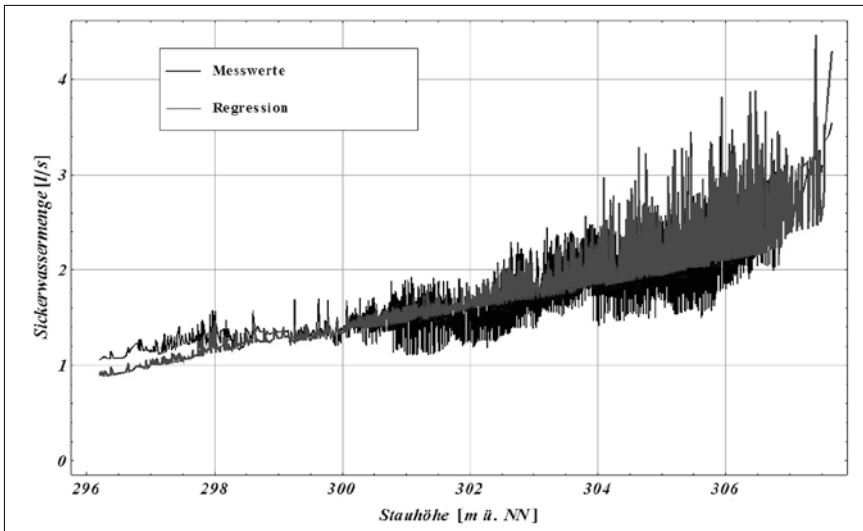


Bild 4: Messwerte und Regressionsergebnis über Stauhöhe für automatische Sickerwassermengensmessung an der Summenmessstelle S3

aufgrund der kurzen Zeitreihe im Gegensatz zu heute die Zeit nicht als Wirkgröße eingeführt worden. Außerdem wurde seinerzeit beim Niederschlag nicht der 10-d-Durchschnittswert verwendet. Obwohl die beiden Berechnungen somit zwar nicht vollständig kompatibel zueinander sind, zeigen sie die Abhängigkeit der Sickerwassermengen von den Wirkgrößen in ähnlicher Größenordnung auf. Insbesondere die Steigungsmaße der Stauhöhe und Abgabe sowie die entsprechenden t-Werte sind in guter Deckung. Bei der aktuell größeren Datenmenge ergeben sich günstigere t-Werte, jedoch geringfügig schlechtere Bestimmtheitsmaße.

Auch die Ergebnisse der Porenwasserdruckmessungen sind größtenteils maßgeblich stauabhängig. Die Messstellen im Felsuntergrund korrelieren gut mit der Stauhöhe, diejenigen im Mauerkörper eher weniger. Bei steigender Stauhöhe in der Mauer zusätzlich anfallendes Sickerwasser wird demnach durch die Drainagen gut abgeführt und baut somit keinen weiteren Druck auf. Dies belegt den Sanierungserfolg. Die manuellen Ablesungen weisen eine gute Übereinstimmung mit der automatischen Porenwasserdruckmessung und eine vergleichbare statistische Güte auf. Dies wird durch nur geringe Differenzen bei den Bestimmtheitsmaßen deutlich.

Anhand der Steigungsmaße der Porenwasserdruckmessung bei Stauhöhenänderungen kann der Abbau des Sohlenwasserdruckes in Fließrichtung unter der Aufstandsfuge gut nachvollzogen werden (Bild 5). Während die wasserseitigen Porenwasserdruckgeber Steigungsmaße von

etwa 60 cm pro m Stauhöhenänderung aufweisen, verringert sich dieser Wert unter dem Kontrollstollen bzw. unter dem luftseitigen Mauerfuß auf 10 bis 20 cm pro m Stauhöhenänderung. In umgekehrter Weise ergibt sich eine stärkere Beeinflussung durch die Talsperrenabgabe (über den Wasserstand im Tosbecken) hauptsächlich an den Messstellen unter dem luftseitigen Mauerfuß.

Des Weiteren ist Bild 5 ein Vergleich der manuellen Messungen im ursprünglichen Bohrprofil E2 mit den automatischen, im nachträglich nach einem Blitzschaden geschaffenen Profil E2N zu entnehmen. Hiernach bestehen in der mittleren und luftseitigen Aufstandsfuge keine nennenswerten Unterschiede. Lediglich am wasserseitigen Mauerfuß ergeben sich Differenzen, wobei die ursprünglichen Messstellen E2-1 und E2-2 (manu-

elle Messung) hinsichtlich der Stauhöhe größere Steigungsmaße als die neu geschaffenen Ersatzmessstellen (automatische Messung) aufweisen. Für die Gesamtsicherheit sind die günstigeren Verhältnisse an den neueren Messstellen jedoch ohne Belang. In der Statik zur Stauauersanierung ist ein eventueller Potenzialabbau im Intzekeil nicht berücksichtigt worden, so dass am wasserseitigen Mauerfuß mit einem größeren Wasserdruck gerechnet wurde als ihn die Messstellen ausweisen.

3 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Messdatenanalyse bestätigt den Erfolg der vor nunmehr 12 Jahren abgeschlossenen umfangreichen Sanierung der Ennepestauwand. Die ausgewerteten Verformungen, Grundwasserstände, Sickerwassermengen und Porenwasserdrücke resultieren aus den physikalischen Zusammenhängen mit den Wirkgrößen und sind in der aufgetretenen Größe nachvollziehbar. Zeitabhängige Verformungsanteile fallen gegenüber den Wirkgrößen Stauhöhe und Temperatur deutlich geringer aus. Das Verformungsverhalten an der Ennepemauer ist demnach hauptsächlich elastisch, plastische Kriechverformungen sind nur sehr geringwertig zu beobachten. Bei den geohydraulischen Messungen fungieren neben der Stauhöhe auch Niederschläge und die Talsperrenabgabe als Wirkgrößen. Hier ist vereinzelt zeitabhängiges Verhalten auf lokale Gegebenheiten, wie Veränderungen der Fließwegigkeiten durch Versinterungen oder Auswaschungen, zurückzuführen.

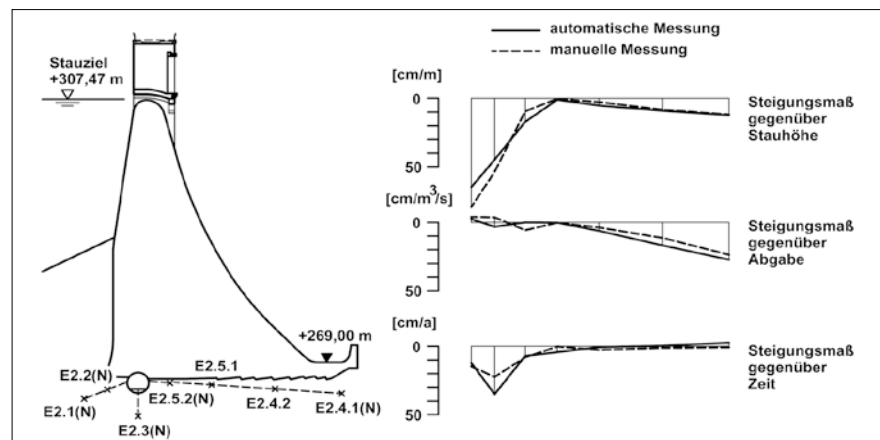


Bild 5: Steigungsmaße der Porenwasserdruckmessungen in der Sohlenfuge im Profil E2/E2N

Die festgestellten physikalischen Zusammenhänge decken sich mit den im Rahmen des Probestaus ermittelten Beobachtungen. In den vergangenen 12 Jahren nach Beendigung der Sanierung ist somit keine nennenswerte Veränderung des grundsätzlichen Staumauerungsverhaltens gegenüber den Wirkgrößen eingetreten. Im Vergleich mit den in der Sanierungsplanung angenommenen Durchsickerungen ist der Mauerkörper wesentlich trockener. Ein nennenswerter Porenwasserdruck ist im luftseitigen Teil des Mauerkörpers nicht vorhanden.

Die Ennepetalsperre verfügt hinsichtlich ihrer Messausstattung über den höchsten Automatisierungsgrad aller Ruhrverbandstalsperren. Die meisten Messwerte werden daher sowohl automatisch als auch aus Redundanzgründen mit geringerer Häufigkeit manuell erfasst. Gegenüber einer automatischen Messung tritt bei der manuellen Erfassung die Ableseungenauigkeit als zusätzliche Fehlergröße hinzu.

Erwartungsgemäß sind die Regressionsergebnisse der automatischen Messungen daher grundsätzlich statistisch besser belegt. Die Unterschiede, beispielsweise hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes, sind jedoch sehr gering, was auf eine hohe Qualität der manuellen Ablesungen schließen lässt. Bei den Lotablesungen ergeben sich zum Teil sogar bessere statistische Parameter für die manuelle Ablesung. Dies begründet sich durch die beschriebenen, anfänglichen Probleme beim automatischen Abgriff.

Autor

Dipl.-Ing. Frank Roesler

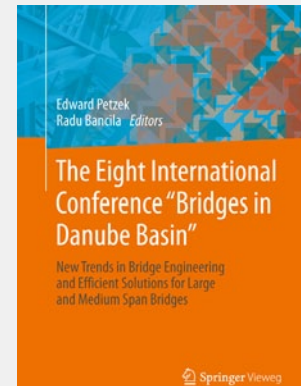
Ruhrverband
Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen
frank.roesler@ruhrverband.de

Literatur

- [1] Bettzieche, V.: Vertiefte Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. In: Tagungsband zum III. Mitweidaer Talsperrentag, 2002.

 Springer Vieweg

New Trends in Bridge Engineering



E. Petzek, R. Bancila (Eds.)

The Eight International Conference "Bridges in Danube Basin"

The river Danube is an international waterway flowing 2857 km across Europe from the heights of the Schwarzwald massif down in the Black Sea delta. In its passage, the second longest European river crosses 22 geographical longitudes, joining 8 countries: Germany, Austria, Slovakia, Hungary, Serbia, Romania, Bulgaria and Ukraine. The International Conference on Bridges across the Danube has become a traditional international event in bridge engineering, initiated by Prof. Miklos Iványi and organized periodically each third year in different Danube countries.

2014. X, 534 p. 120 illus. Geb.
€ (D) 203,29 | € (A) 208,99 |
*sFr 253,00
ISBN 978-3-658-03713-0 (Print)

€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

springer-vieweg.de

Frank Roesler

Detailed Analysis of the Measured Data of the Ennepe Dam – 10 Years after its Rehabilitation

The Ennepe dam was rehabilitated from 1997 to 2002. The approval for rehabilitation required, among other things, the documentation of success of the rehabilitation by a detailed safety assessment 10 years after rehabilitation. Within the detailed safety assessment, all relevant information and input variables concerning the structural safety of the dam had to be scrutinized and evaluated. In this context locally measured data, for example measurements of deformations, leakage water or pore water pressures, was of great importance. This review describes the regression analysis of the measured data and its dependence on the influencing variables like storage level and temperature.

Франк Роеслер

Углубленный анализ результатов измерений на плотине из кладки на реке Эннепе (Еннере) – через 10 лет после проведения санирования

С 1997 по 2002 год проводилось санирование плотины из кладки на реке Эннепе (Еннере). В разрешающие документы, кроме всего прочего, было включено обязательство подтверждения успешных результатов санирования, выполнение которого должно быть проведено посредством углубленного контроля через 10 лет после окончания санирования. В рамках углубленного контроля были, в частности, по-новому поставлены вопросы касательно всех релевантных в отношении запаса устойчивости входных величин и произведена их оценка. При этом большое значение для оценки надежности сооружения имели также полученные на местах результаты измерения, об углубленном регрессионном анализе которых рассказывается в данной статье.