

## **Monitoring als Grundlage einer kostengünstigen Talsperrensanierung**

Dr.-Ing. V. Bettzieche, Dipl.-Ing. C. Heitefuss

### **1 Einleitung**

Seit mehr als 100 Jahren ist der Ruhrverband im Einzugsgebiet der Ruhr für die Wasserversorgung zuständig. Vornehmlich zur Sicherstellung der Versorgung des Ruhrgebiets betreibt er 8 Talsperren mit einem Gesamtstauraum von mehr als 470 Mio. m<sup>3</sup>. Im Juni 1997 wurde die fast 100 Jahre alte Ennepetalsperre vom Ruhrverband übernommen, da der vormalige Eigentümer finanziell nicht in der Lage war, die Staumauer an den Stand der Technik anzupassen. Wichtigster Bestandteil der Sanierung war die Auffahrung eines Kontroll- und Drainagegestollens mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine [7].

Voraussetzung für die gewählte Sanierungsvariante war die Genehmigung der Talsperrenaufsicht. Diese forderte sowohl den Nachweis der Machbarkeit (a priori), der auf der Grundlage von numerischen Modellen geführt werden konnte, als auch die nachträgliche Bestätigung des Sanierungserfolges (a posteriori) durch entsprechende Messungen.

### **2 Entwicklung eines Sanierungskonzeptes**

Wie viele alte Bruchsteinmauern besaß auch die Ennepestaumauer einen wasserseitigen Dichtungsanstrich und ein Drainagesystem. Diese Drainagerohre versinterten jedoch im Laufe der Jahre und wurden letztendlich im Zuge einer Sanierung 1959 verpresst.

Der Entwurf der Ennepestaumauer stammte von Prof. Intze, der aufgrund des Dichtungs- und Drainsystems keinen Wasserdruck im Inneren der Staumauer und in der Sohlfuge vorgesehen hatte. Der Wegfall der Drainagewirkung führte jedoch zum Eindringen von Wasser und so zu einem statisch ungünstigen Auftrieb im Mauerkörper. Dieses Phänomen wurde Anfang der 80er Jahre an der Ennepestaumauer wie an vielen gleich alten Bruchsteinmauern festgestellt. Die Aufsichtsbehörden verfügten eine sofortige Absenkung der Talsperre und eine Anpassung an die allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Der damalige Eigentümer der Ennepetalsperre ließ von verschiedenen Ingenieurbüros Sanierungsvarianten erarbeiten. Eine der vorgesehenen Lösungen bestand in der Abdichtung der Staumauer durch eine wasserseitige Vorsatzschale (s. Abbildung 1). Eine Variante, die an mehreren Staumauern erfolgreich

realisiert wurde und für die Ennepestaumauer Kosten von etwa 40 Mio. € verursacht hätte.

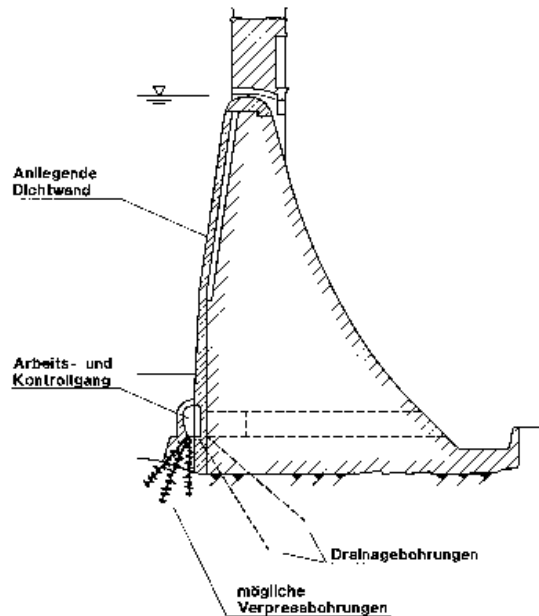


Abbildung 1: Ältere Sanierungsvariante mit einer Beton-Vorsatzschale

Da der Eigentümer diese Mittel nicht aufbringen konnte, übernahm der Ruhrverband 1997 die Ennepetalsperre mit der Verpflichtung, die Staumauer zu sanieren. Das vom Ruhrverband vorgelegte neue Sanierungskonzept sah die Reduzierung des unplanmäßigen Auftriebs vor (s. Abbildung 2) durch:

- Auffahrung eines Drainage- und Kontrollstollens im Bereich der Gründungsfuge,
- unter Vollstau, d.h. voller Betriebsfähigkeit der Talsperre und
- der Einrichtung eines Drainagesystems im Mauerkörper

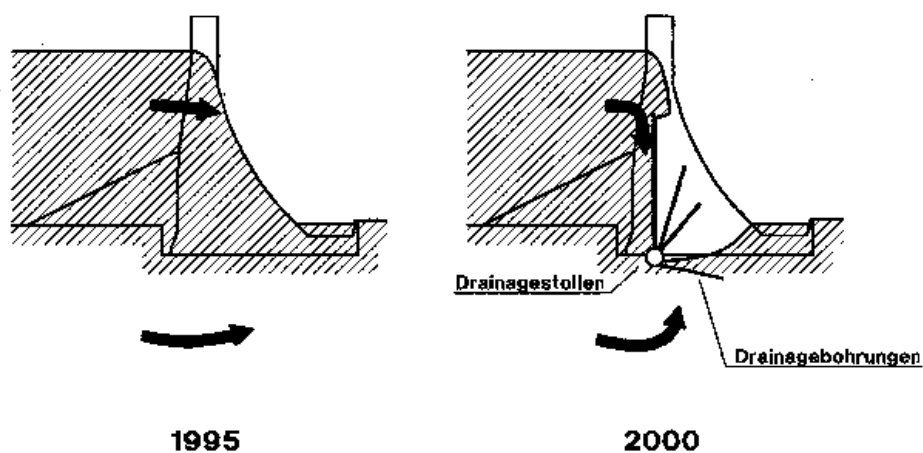


Abbildung 2: Konzept der Sanierung der Ennepestaumauer

Die Sanierungskosten konnten mit nur noch 20 Mio. € veranschlagt werden, einschließlich

- des Relinings der Einlaufstollen, sowie Einrichtung eines Revisionsverschlusses,
- der Erneuerung der Einlaufverschlüsse und Grundablassleitungen und
- der Erneuerung der Trinkwasserentnahmeeinrichtungen.

Das Sanierungskonzept wurde genehmigungsfähig vervollständigt und der Tal-sperrenaufsicht vorgelegt. Diese stimmte der Vorgehensweise zu unter dem Vorbehalt der nachträglichen Verifikation der getroffenen Annahmen auf der Grundlage von durchzuführenden Messungen.

### **3 Voruntersuchungen mit Hilfe von FEM-Modellen**

Die Sanierungsplanung beruhte auf verschiedenen numerischen Modellen, mit denen untersucht wurde, ob die Standsicherheit der Staumauer wieder erreicht werden könnte. Erst aufgrund der positiven Prognose dieser Simulationen (a priori) erlaubten die Aufsichtsbehörden 1998 die Auffahrung eines Drainagestollens unter der Staumauer.

Drei Modelle, basierend auf der Methode der Finiten Elemente (FEM), wurden eingesetzt:

- ein Strömungsmodell zur Abbildung der Durchsickerung und Ermittlung der Wasserdruckkräfte im Inneren des Mauerkörpers,
- ein Wärmeflussmodell zur Quantifizierung des jahreszeitlichen Temperatureinflusses und der hieraus resultierenden Eigenspannungen im Bauwerk,
- ein Rissmodell zum Nachweis der Standsicherheit und Rissfreiheit, im Wesentlichen unter den anhand der ersten beiden Modelle ermittelten Belastungen.

#### **3.1 Strömungsmodell**

Ein repräsentativer Mauerquerschnitt samt Intzekeil sowie ein Ausschnitt des Untergrundes wurden durch ein ebenes FE-Modell abgebildet, das auch die Porenwasserdruckgeber berücksichtigte. Den verschiedenen Materialbereichen (Mauerwerk, Intzekeil, Fels) wurden Durchlässigkeiten zugeordnet, die anhand von hydrogeologischen Untersuchungen festgestellt worden waren. Schon bei der anschließenden Eichung des Strömungsmodells zeigte sich, dass der obere Felshorizont durchlässiger sein musste als das Mauerwerk selbst. Mit Hilfe des geeichten Modells konnte die Durchströmungssituation für unterschiedliche Stauhöhen, einschließlich verschiedener Hochwasserszenarien, berechnet werden (s. Abbildung 3).

Wesentlicher Bestandteil der Modelluntersuchung war der Nachweis der flächigen Wirkung der senkrechten Drainagebohrungen, die fächerförmig im Abstand von 4 m angeordnet sind. Hierzu wurde ein dreidimensionales Strömungsmodell erstellt. Abbildung 4 verdeutlicht die errechneten Druckdifferenzen zwischen der Ebene, in der die Drainagen eingerichtet sind und der Ebene mittig

zwischen den Drainagefächern. Die flächige Wirkung ist dadurch belegt, dass die Druckunterschiede nur im Nahbereich der Bohrungen signifikant sind.

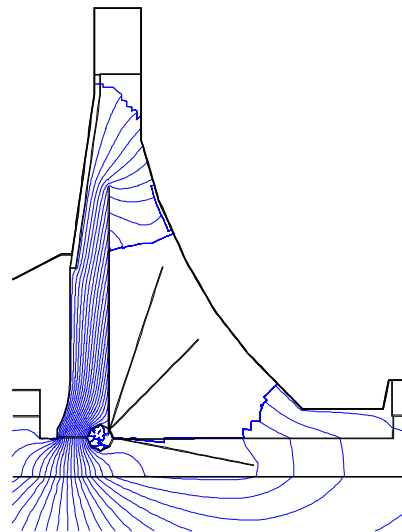


Abbildung 3: Isoglyphen der Porenwasserdruckhöhen bei Vollstau

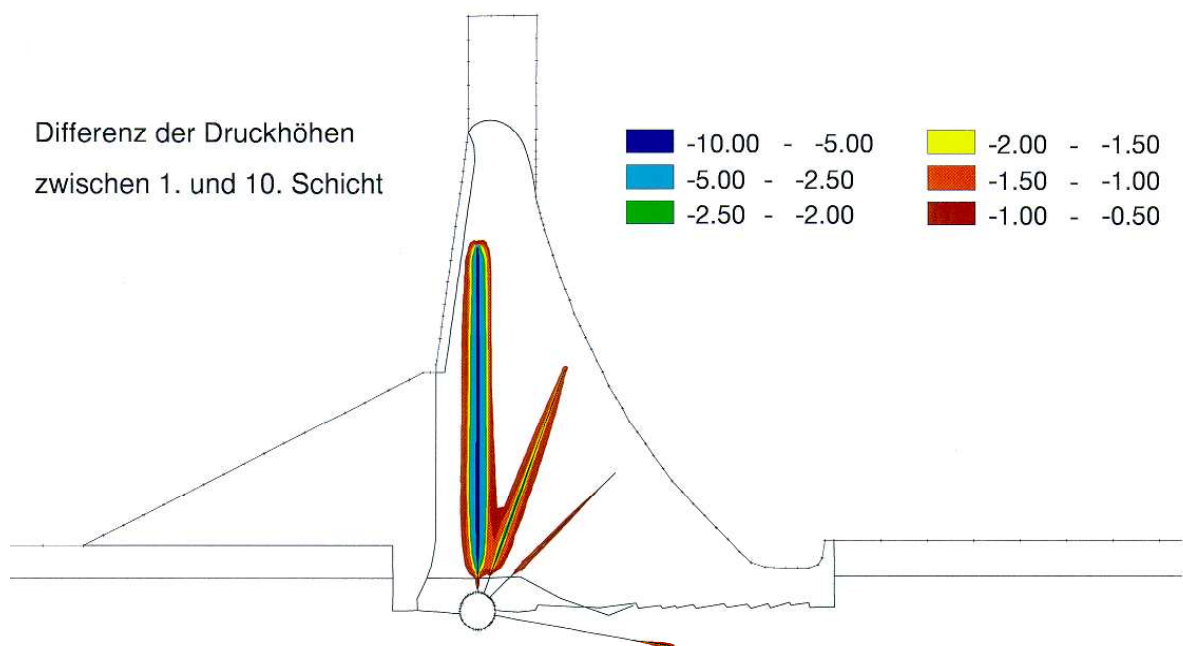


Abbildung 4: Differenzen der Porenwasserdruckhöhen (in m Ws) zwischen der Schnittebene der Drainagen und der Schnittebene zwischen den Drainagen

### 3.2 Wärmeflussmodell

Zur Berechnung des Wärmeflusses wurde ein FE-Modell erstellt, das im gleichen Schnitt wie das Strömungsmodell liegt. Für die Berechnung des Wärmeflusses wurden von jedem Material die drei Kennwerte - Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität - benötigt. Während die Dichte von Fels, Mauerwerk und Intzekeil ausreichend bekannt waren, mussten die speziell zur Berechnung des Wärmeflusses benötigten Materialdaten der Literatur [1] entnommen werden (s. Tabelle 1).

| Material            | Dichte              | Wärmeleitfähigkeit | Wärmekapazität |
|---------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| Einheit             | g / cm <sup>3</sup> | W / (m * K)        | kJ / (kg * K)  |
| Staumauer           | 2,37                | 3,32               | 0,71           |
| Fels                | 2,70                | 3,00               | 0,43           |
| Lehm des Intzekeils | 2,00                | 1,20               | 1,38           |

Tabelle 1: Materialwerte bei der Simulation des Wärmeflusses

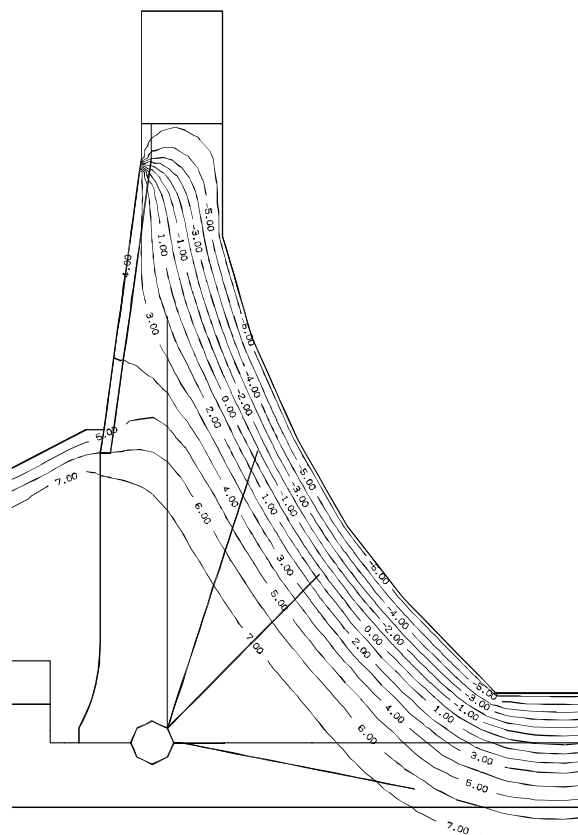


Abbildung 5: Temperaturverteilung im Staumauerkörper in einem extremen Winter

Die Luft- und Wassertemperaturen wurden mit ihrem zeitlichen Verlauf als Randbedingungen an den jeweiligen Bereichen der Maueroberfläche sowie an der Oberkante des Intzekeils und des Untergrundes eingegeben. Hierbei war die gleichfalls wechselnde Stauhöhe zu berücksichtigen.

Für die Ennepestaumauer wurden zwei Szenarien simuliert:

- mittlerer Jahrgang der Temperatur und
- seltenes Temperaturereignis extrem kalter Winter (durchschnittliche Wiederholzeitspanne von 200 Jahren).

### 3.3 Rissmodell

Der Standsicherheitsnachweis einer Staumauer ist in Deutschland nach DIN 19700 Teil 11 zu führen (s.a. [2]). Die Norm unterscheidet drei Bemessungsfälle, für die verschiedene Lastfälle mit unterschiedlichen Widerlagerzuständen zu kombinieren sind. Maßgeblich sind meist die Bemessungsfälle I und III.

Im Bemessungsfall I sind vor allem ständig wirkende Lasten zu berücksichtigen. Hierzu gehören neben den Eigenlasten der Wasserdruck aus der gefüllten Talsperre sowie Temperaturänderungen. Entscheidendes Bemessungskriterium wird meist die Forderung des Ausschlusses von vertikalen Zugspannungen bzw. horizontalen Rissen an der Wasserseite der Mauer.

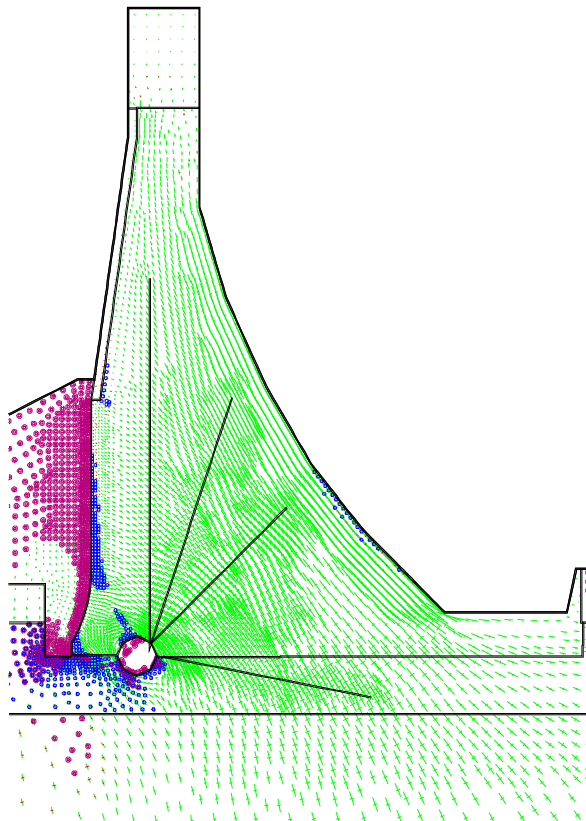


Abbildung 6: Hauptspannungstrajektorien und Risszonen in der Staumauer bei extremem Hochwasser

Der Bemessungsfall III betrachtet Extremsituationen wie den Stau bis zur Mauerkrone während eines extremen Hochwassers. In diesen selten auftretenden Situationen ist eine klaffende Fuge bis zur Mauermitte zugelassen. Da das Talsperrenwasser in diese Fuge eintreten wird, muss der zugehörige Wasserdruck in der Fuge berücksichtigt werden.

Für die Ennepestaumauer wurde der Standsicherheitsnachweis entsprechend geführt. Die Wirkungen der Wasserlast und Temperatureinflüsse konnten anhand der beschriebenen Simulationen realistisch berücksichtigt werden.

Es zeigte sich, dass die Eigenspannungen der Staumauer im Winter zu einer deutlichen Verminderung der Druckspannungen an der Wasserseite führen. Im Bemessungsfall I, also bei gefüllter Talsperre, reduzieren diese Temperatureigenspannungen sowie die aus dem Wasserdruck an der Wasserseite resultierenden Zugspannungen die Druckspannungen aus dem Eigengewicht der Mauer nahezu auf Null an der Wasserseite der Staumauer. Ein Riss oder eine klaffende Fuge tritt jedoch nicht auf.

Bei einem extremen Hochwasser des Bemessungsfalls III und entsprechend höherem Wasserstand in der Talsperre entstehen jedoch vertikale Zugspannungen an der Wasserseite der Mauer. Da diese zumindest rechnerisch nicht aufgenommen werden können, ist die Wirkung der an diesen Stellen auftretenden Risse zu untersuchen. Durch den Riss ändert sich das Strömungsbild des Wassers in der Staumauer, so dass eine erneute Strömungsberechnung durchgeführt werden muss. Mit den veränderten Lasten erfolgt eine erneute Berechnung und ggf. weitere Iterationen, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Wird dann die Bedingung der Klaffung bis zur Mauermitte eingehalten, so ist der Standsicherheitsnachweis auch für die Extremsituation im Wesentlichen geführt. Dies konnte für die Ennepestaumauer gezeigt werden.

#### **4 Messeinrichtungen**

Zur Überwachung des Sanierungserfolgs wurden nach Fertigstellung des Kontroll- und Drainagestollens entsprechend den Empfehlungen des ATV-DVWK Merkblatts [1] verschiedene Messeinrichtungen in die Ennepestaumauer eingebaut. Diese sollen zunächst den Sanierungserfolg überwachen und in der anschließenden Betriebszeit die nachhaltige Wirkung kontrollieren. Im Wesentlichen wurden folgende Messeinrichtungen installiert (s. Abbildung 7):

- 2 Lotanlagen, jeweils aus Schwimm- und Gewichtslot bestehend,
- 2 Messquerschnitte mit insgesamt 40 Temperaturfühlern,
- 2 Messquerschnitte mit insgesamt 18 Schwingsaitenpiezometern zur Überwachung der Porenwasserdrücke (s. Abbildung 8),
- 3 Thomsonwehre zur Überwachung der Sickerwassermengen sowie
- ein geodätisches Messsystem mit 40 Objektpunkten auf der luftseitigen Maueroberfläche

Alle Messwerte werden elektronisch erfasst und können vom Talsperrenbetrieb und der Hauptverwaltung des Ruhrverbands fernabgefragt werden.

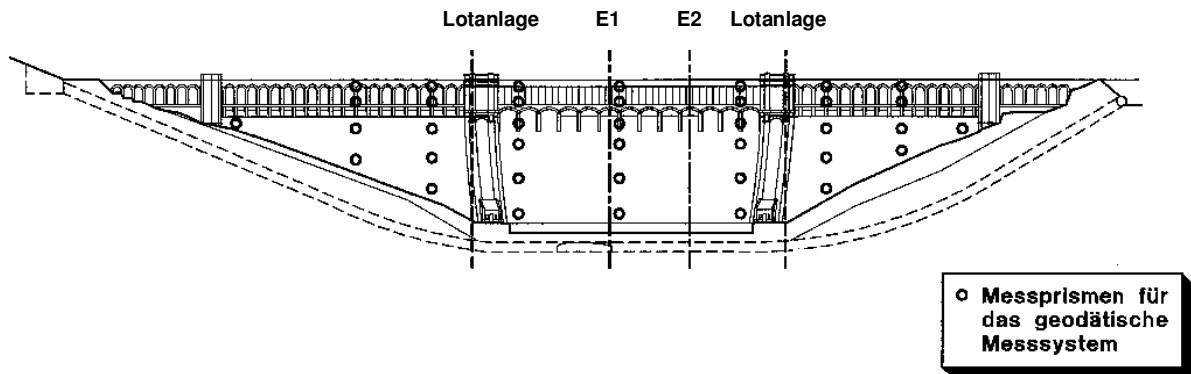


Abbildung 7: Messeinrichtungen der Ennepestaumauer

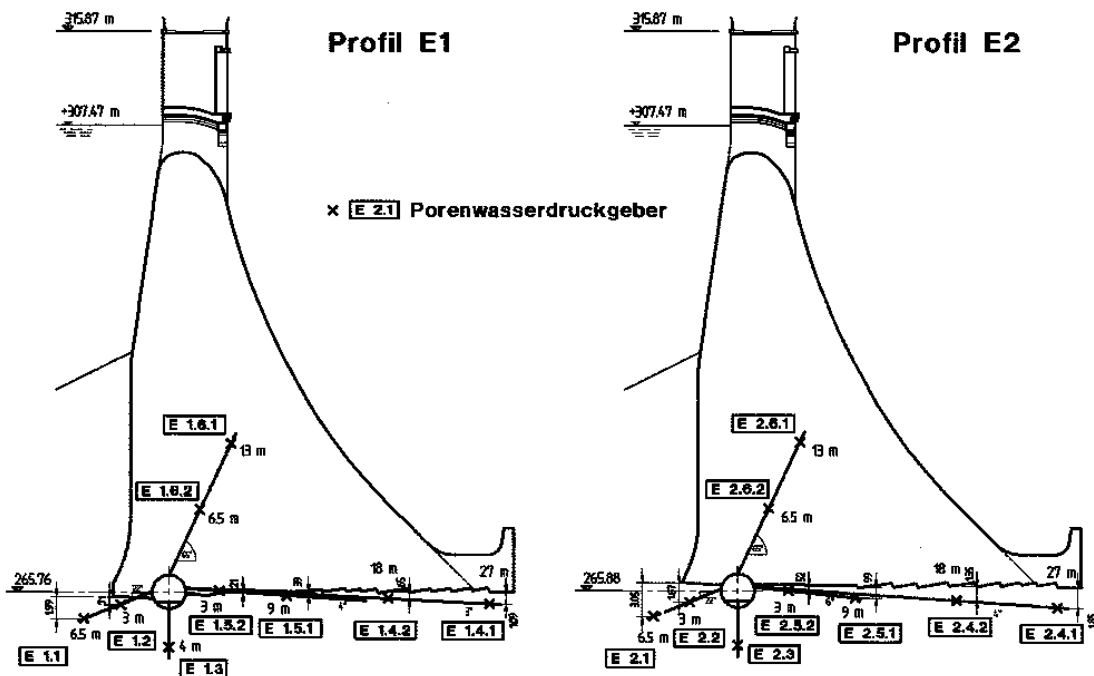


Abbildung 8: Porenwasserdruckgeber in der Ennepestaumauer

## 5 A posteriori Untersuchungen

Zusätzlich zu den Messungen an den beschriebenen Messeinrichtungen wurden die Wassermengen gemessen, die aus jeder einzelnen Drainagebohrung ausfließen.

Ein Vergleich dieser Messungen mit den anhand des Strömungsmodells erwarteten Werten ergibt sich durch die Mittelung der gemessenen Bohrlochabflüsse (s. Tabelle 2). Die an den Drainagen im Mauerwerk gemessenen Mengen liegen bei etwa 10% der Prognosen des Modells. Die Staumauer ist also dichter als in der Berechnung angenommen. Die Sickerwasserwerte der Stol-



lenoberfläche sind von gleicher Größenordnung wie in der Berechnung. Hier fließt das Wasser dem Stollen durch den Untergrund zu, dessen Durchlässigkeit den Annahmen entspricht.

|                                       | <b>Strömungsmodell</b> | <b>Messung</b>    |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|
|                                       |                        | Mittel je Bohrung |
|                                       | l/min                  | l/min             |
| <b>Versickerung aus der Talsperre</b> | 11,3                   | ?                 |
| <b>Versickerung aus dem Tosbecken</b> | 0,3                    | ?                 |
| <b>Aussickerung Luftseite</b>         | 0,2                    | ?                 |
| <b>vertikale Drainage (1)</b>         | 2,9                    | 0,30              |
| <b>70° Drainage (2)</b>               | 0,5                    | 0,01              |
| <b>45° Drainage (3)</b>               | 0,1                    | 0,00              |
| <b>Sohldrainage (4)</b>               | 0,7                    | 0,04              |
| <b>Stollenoberfläche</b>              | 7,2                    | 3,85              |

Tabelle 2: Ergebnisse der vorläufigen Sickerwassermessung an den 19 Drainagefächern in Mauermitte, bezogen sich auf einen Drainagefächer, also auf 4 m Länge entlang des Stollens

Auch die Druckmessungen wurden laufend ausgewertet (s. Abbildung 9) und bestätigten schnell den Sanierungserfolg:

1. Der Mauerkörper der Staumauer ist wesentlich trockener als in den Strömungsberechnungen und in der statischen Untersuchung angenommen. Ein nennenswerter Porenwasserdruck ist im Mauerkörper nicht vorhanden.
2. Der Kontrollstollen selbst sorgt für eine weitreichende Dränung der Mauer und des Untergrunds. Im Zusammenwirken mit dem durchlässigen oberen Felshorizont reduziert er den Sohlenwasserdruck und den Wasserdruck im Untergrund.
3. Durch die Einrichtung der Drainagen wurde der Mauerkörper nachhaltig vom Wasserdruck entlastet.
4. Wasserseitig der Staumauer und im Fels unter dem wasserseitigen Mauerfuß findet ein schneller Abbau des Wasserdruck statt.
5. Insgesamt belegen die Messungen den Erfolg der Sanierungen und den Ansatz des Porenwasserdrucks in der Vorstatik.

Diese Ergebnisse bestätigten sich auch in der weiteren Beobachtung. Der Vergleich der Messergebnisse mit der Annahmen der Vorab-(a priori)Simulationen belegt den Sanierungserfolg und dient als Grundlage der Talsperrenüberwachung in den nächsten Betriebsjahren.

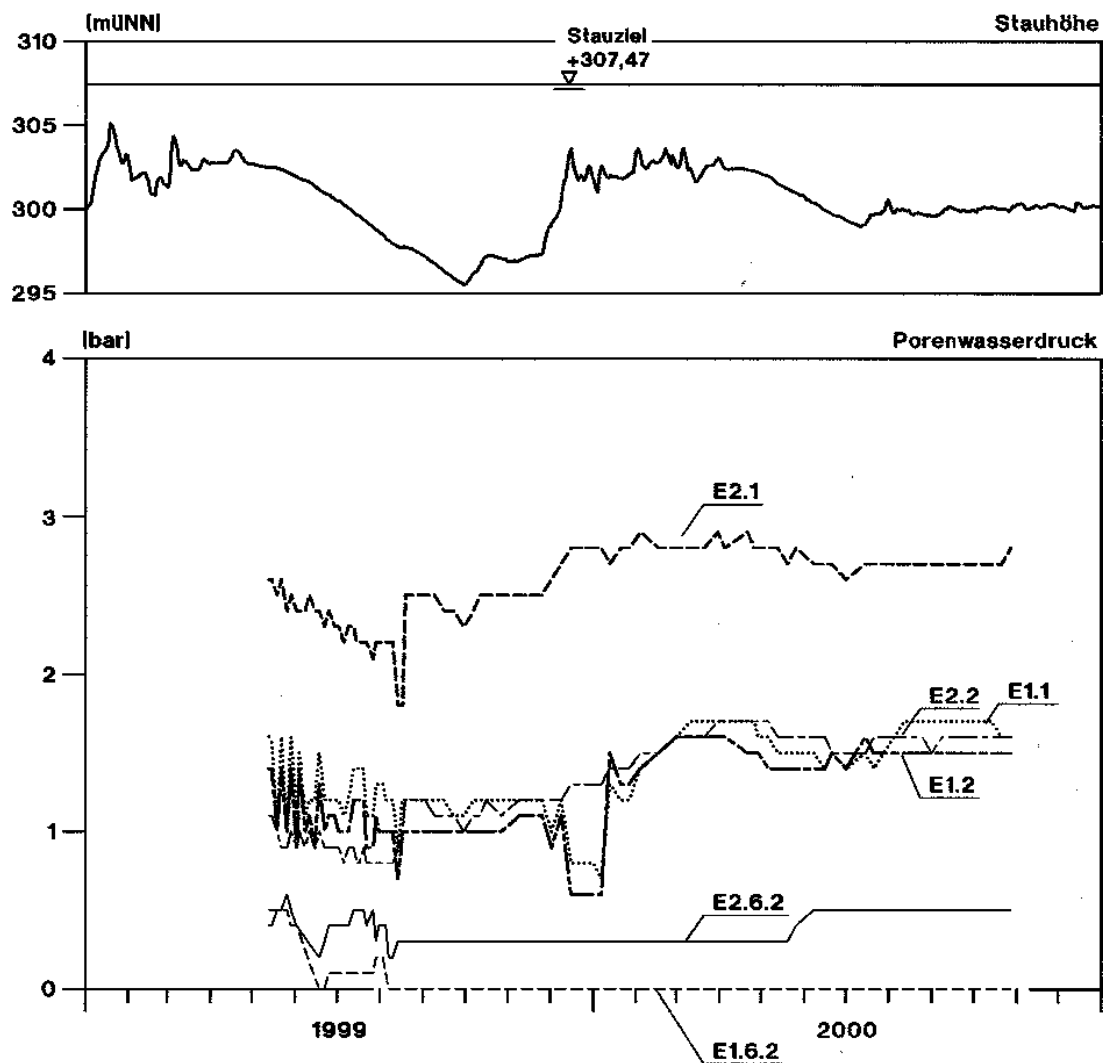


Abbildung 9: Messwerte des Porenwasserdrucks

## 6 Schlussfolgerungen

Bei der Anpassung der Ennepetalsperre an die a.a.R.d.T. wurde ein neuartiger Weg beschritten. Mit Hilfe von numerischen Simulationen und Messungen sowie einem neuen Verfahren zum Vortrieb des Stollens konnten die Sanierungskosten von 40 Mio. € auf 20 Mio. € halbiert werden. Nach Abschluss der Arbeiten wird die Talsperre wieder für Jahrzehnte ohne Einschränkungen betrieben werden können. Sie wird dann aus technischer Sicht einem neuen Bauwerk gleichen.

## 7 Literatur

- [1] ATV-DVWK; Meß- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 222; 1991
- [2] ATV-DVWK; Berechnungsverfahren für Gewichtsstaumauern - Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 242; 1996
- [3] Bettzieche, V.; Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer, Wasserwirtschaft 87, Heft 3, 1997
- [4] Bettzieche, V.; Erfahrungen bei der messtechnischen Überwachung von Talsperren; Scientific Reports; Journal of The Mittweida University of Technology and Economics; Volume III, Mittweida, 1/1997
- [5] Bettzieche, V., König, C., Könke, C.: Simulation of hydrofracturing in masonry dam structures; XIII International Conference on Computational Methods in Water Resources; Calgary, Canada; Juni 2000
- [6] Bettzieche, V.; Temperaturmessung in einer Staumauer mittels Glasfaserkabel, Wasserwirtschaft 91, Heft 3, 2001
- [7] Heitefuss, C., Rissler, P.; Upgrading of the Ennepe dam; Hydropower & Dams Issue Two; Volume six; 1999

Dr.-Ing. Volker Bettzieche, Leiter der Abteilung Talsperrenüberwachung und Geotechnik, Ruhrverband, Kronprinzenstr. 37, 45128 Essen, vbe@ruhrverband.de

Dipl.-Ing. Christian Heitefuss, Leiter der Zentralabteilung Talsperrenwesen, Ruhrverband, Kronprinzenstr. 37, 45128 Essen, chi@ruhrverband.de