

Plausibilisierung von Porenwasserdruckmessungen an den Talsperren der WSV Eder und Diemel

Dr.-Ing. Hector Montenegro, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Abteilung Geotechnik

1 Die WSV-Talsperren Eder und Diemel

Die vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hann. Münden bewirtschafteten Eder- und Diemeltalsperre dienen zur Niedrigwasseraufhöhung der Oberweser, dem Hochwasserschutz sowie der Energiegewinnung. Die Edertalsperre (Bild 1) wurde in den Jahren 1908 bis 1914 in einer ca. 400 m breiten Engstelle des Edertales bei Hemfurth errichtet. Die Staumauer ist als gekrümmte Schwergewichtsmauer aus Grauwackebruchsteinen mit einer Höhe von 47 m gebaut. Die Breite der Staumauer beträgt an der Basis 36 m und an der Krone 5 m. Mit einer Kronenlänge von ca. 400 m staut das Bauwerk den Edersee mit einer Fläche von 11,5 km² und einem Volumen von rund 200 Millionen m³. Bei einem Luftangriff 1943 im zweiten Weltkrieg wurde die Staumauer durch eine speziell hergestellte Bombe zerstört. Die Sprenglücke mit ca. 60 m oberer Breite und 22 m Tiefe erfasste ein Mauerwerksvolumen von ca. 12.000 m³. Durch die Bresche wälzte sich eine rund 9 m hohe Flutwelle mit ca. 8.500 m³/s durch das Edertal und richtete gewaltige Zerstörungen an. Die Wiederherstellung begann noch im Jahr 1943, allerdings führten die von der Bombe verursachten Einwirkungen zu vermehrtem Wasserdurchfluss durch das Mauerwerk. Deshalb wurden bereits 1946/47 erste Verpressungen und 1961/62 ein kompletter Verpressschleier mit Zementleim hergestellt. 1994, nach etwa 80 Betriebsjahren, wurde die Staumauer grundinstandgesetzt. Unter anderem wurden hierbei von der Krone bis tief unter die Gründungssohle Felsanker durch die Staumauer eingebracht.



Bild 1: Luftbild der Edertalsperre

Die Diemeltalsperre wurde in den Jahren 1912 bis 1914 und 1919 bis 1923 kurz unterhalb des Zusammenflusses von Itter und Diemel errichtet. Die Staumauer ist als gekrümmte Schwergewichtsmauer mit einer Höhe von 42 m, einer Kronenlänge von 194 m und einer Kronenbreite von 7 m hergestellt. Die Staumauer der Diemeltalsperre ist etwa so hoch wie die der Edertalsperre. Allerdings staut sie entsprechend ihrem Einzugsgebiet mit 19,93 Millionen m³ nur etwa 10 % des Inhalts der Edertalsperre. Die Fläche des Stausees beträgt 1,65 km². Nach etwa 75 Betriebsjahren wurde die Staumauer ebenfalls grundinstandgesetzt. Hierbei wurden unter anderem ein Dichtungsschleier injiziert sowie ein Kontrollgang innerhalb des Bauwerks ausgebrochen. Diese Bauarbeiten wurden 1998 abgeschlossen.



Bild 2: Blick von Unterwasser auf die Staumauer der Diemeltalsperre

2 Bewertung der Standsicherheit der WSV-Talsperren

Im Zuge der Forderungen der 2004 erschienenen, überarbeiteten DIN 19700 (Teil 10 und Teil 11) ist es notwendig, eine grundsätzliche Bewertung der Standsicherheit der beiden WSV-Talsperren Eder und Diemel vorzunehmen. Ein entsprechender Auftrag des zuständigen WSA Hann. Münden erging 2007 an die BAW. Die Abteilung Bautechnik, Referat B1 übernahm die Koordination dieser Untersuchungen. Die abteilungsübergreifenden Aufgabenstellungen betreffen unter anderem messtechnische, baustoffliche sowie geohydraulische Aspekte. Dem Referat Grundwasser fiel die Aufgabe zu, die bisherigen, im Inneren der Staumauer durchgeführten Porenwasserdruckmessungen aufzubereiten und zu plausibilisieren. Im Nachlauf hierzu ist gemeinsam mit allen Projektbeteiligten eine Messkonzeption für die normenseitig geforderten Überwachungsmessungen an den Staumauern auf der Basis robuster, redundanter und austauschbarer Messgeber unter Berücksichtigung der Anforderungen aus den Standsicherheits- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen auszuarbeiten.

3 Geohydraulische Untersuchungen

Eine erste Sichtung der Porenwasserdruckmessungen ergab zunächst ein etwas verwirrendes Bild. So war an einigen Druckaufnehmern der Jahresgang der Speicherfüllung deutlich zu erkennen (Bild 3), an anderen jedoch nur in stark gedämpfter Form. Ein Großteil jedoch zeigte einen nahezu konstanten Verlauf (Bild 4) oder reagierte nur zu bestimmten Zeiten. Dies erzeugte zunächst Zweifel an der Funktionsfähigkeit der eingebauten Instrumente. Es war jedoch auffällig, dass nahezu sämtliche Absolutdruckaufnehmer, die keinen Jahresgang aufwiesen, keinen oder lediglich einen sehr geringen Wasserdruck anzeigten. Ein Abgleich mit Zeitreihen des unabhängig gemessenen Luftdrucks zeigte, dass fast alle dieser Druckaufnehmer die Luftdruckschwankungen, zum Teil etwas gedämpft je nach ihrer Einbaulage, aufzeichneten. Dies war ein Indiz für die Funktionsfähigkeit der Messgeräte. Gleichzeitig bedeutete dies, dass die Druckaufnehmer ständig oder über lange Zeiträume hinweg oberhalb der Sickerlinie angeordnet waren, was in Hinblick auf ein Monitoringsystem nicht optimal ist.

Die Wasserdruckdaten lassen sich nur unter Berücksichtigung des vorhandenen geohydraulischen Systems interpretieren. Dieses System stellt eine Kombination aus Untergrund, Bauwerk sowie darin integrierten Drän- und Dichtungselementen dar. Um die im Bauwerk gemessenen Ganglinien der Porenwasserdrücke geohydraulisch interpretieren zu können, ist die Kenntnis der Strömungsverhältnisse in sowie

unterhalb des Bauwerks unumgänglich, wozu eine numerische Strömungsmodellierung mittels Finite-Elemente (FE)-Methode geeignet ist.

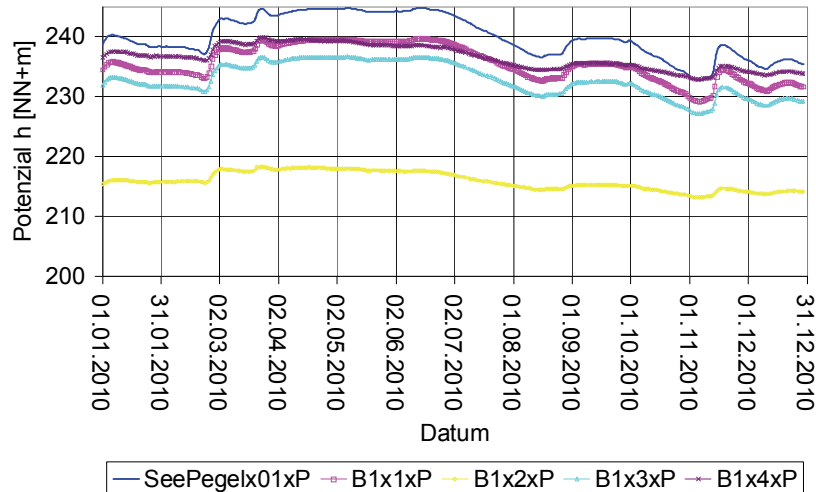


Bild 3: Ganglinien am Messquerschnitt B1 der Edertalsperre

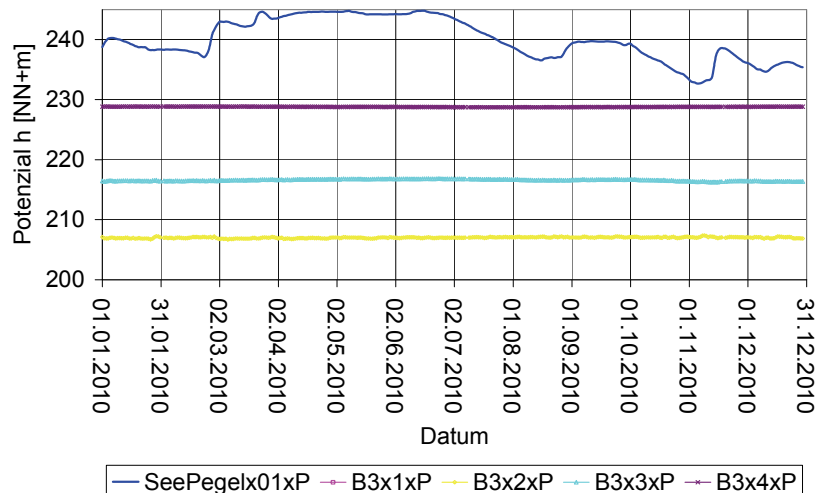


Bild 4: Ganglinien am Messquerschnitt B3 der Edertalsperre

4 FE-Strömungsmodell

Die Durchströmung einer Staumauer (poröses Medium) lässt sich grundsätzlich auf Grundlage der Darcy-Gleichung beschreiben (Bettzieche, 2004). Aufgrund des großen Krümmungsradius reicht im ersten Schritt eine vertikal-ebene Abbildung eines repräsentativen Mauerquerschnitts aus. Um bei der Durchströmung des Bauwerks den a priori unbekanntem Verlauf der Sickerlinie im Bauwerk abzubilden, ist ein Modell erforderlich, das den Übergang zwischen wassergesättigten und -ungesättigten Bereiche abbilden kann. Um die Reaktion der Porenwasserdruckaufnehmer auf die wechselnden Füllungswasserstände beschreiben zu können, wurde die Strömung instationär berechnet.

Details zur Modellerstellung, zur Parameterbestimmung und zu allgemeine Randbedingungen werden im Folgenden anhand des Modells der Diemelstaumauer dargestellt. Deren Zustand nach der Sanierung ist im Querschnitt in Bild 3 zu sehen ist. Bei der Grundinstandsetzung der Diemeltalsperre wurde von der

Krone aus ein Dichtungsschleier durch die gesamte Staumauer hindurch injiziert. Unmittelbar dahinter wurden zur Fassung von eventuell den Injektionsschleier durchdringendem Sickerwasser Drainagebohrungen niedergebracht. Von dem ausgebrochenen Kontrollgang wurde der vertikale Injektionsschleier zur Wasserseite hin schräg bis tief in den Untergrund verlängert. Zur Luftseite hin wurden ebenfalls schräg weitere Drainagebohrungen niedergebracht, die den Sohlwasserdruck in diesem Bereich entlasten sollen. Das Wasser der oberen und unteren Drainagebohrungen wird im unteren Kontrollgang gefasst und abgeleitet.

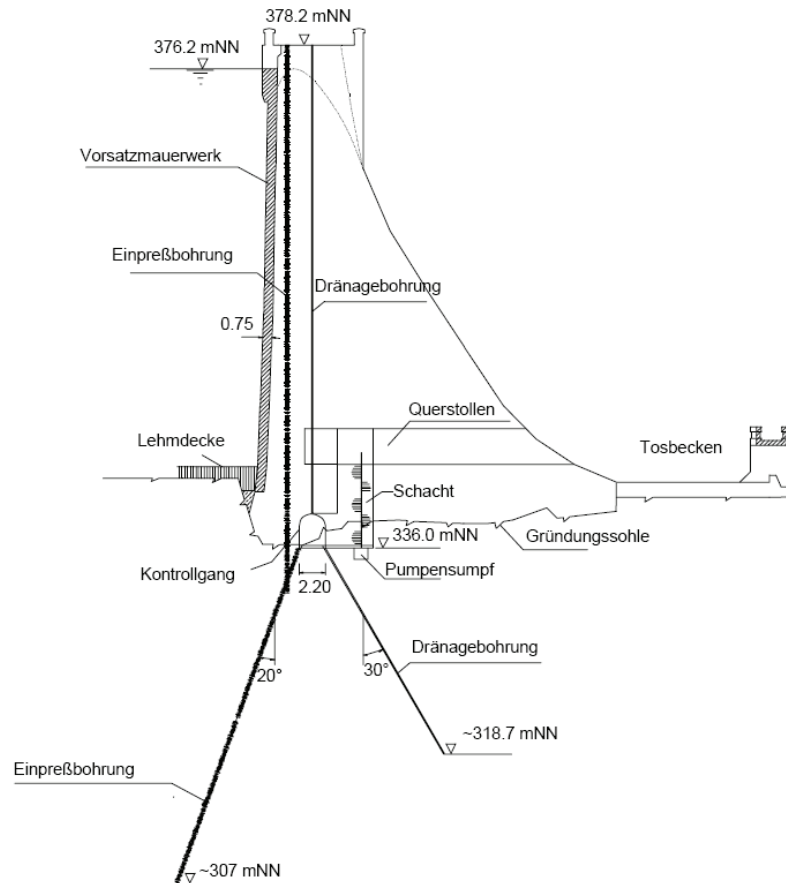


Bild 5: Querschnitt der Diemelstaumauer nach der Sanierung (Tönnies, 2002)

Diskretisierung

Die Geometrie des Bauwerks sowie der Aufbau des Untergrunds wurden im FE-Netz abgebildet (Bild 6). Die Bereiche, die starke Potentialgradienten erwarten lassen, wie beim Injektionsschleier und auch bei den Drainagebohrungen, wurden räumlich feiner aufgelöst. Ebenso wurde verfahren in Bereichen des abgebildeten Staumauerquerschnitts, an denen sich ein Sickerwasseraustritt ergibt, um die Berechnung stabiler zu machen.

Modellparameter

Für den Untergrund, die Staumauer sowie den Dichtungsschleier werden Durchlässigkeits- und Speicherparameter benötigt. Für die Staumauer waren ferner eine repräsentative Saugspannung-Wassergehaltsbeziehung (pF -Kurve) sowie eine Funktion der ungesättigten Durchlässigkeit (k_r -Beziehung) vorzugeben (Montenegro, 1995). Diese Materialparameter wurden im ersten Schritt abgeschätzt und sollen im Laufe der weiteren Bearbeitung über eine Anpassung der Berechnung an die Messungen invers bestimmt werden.

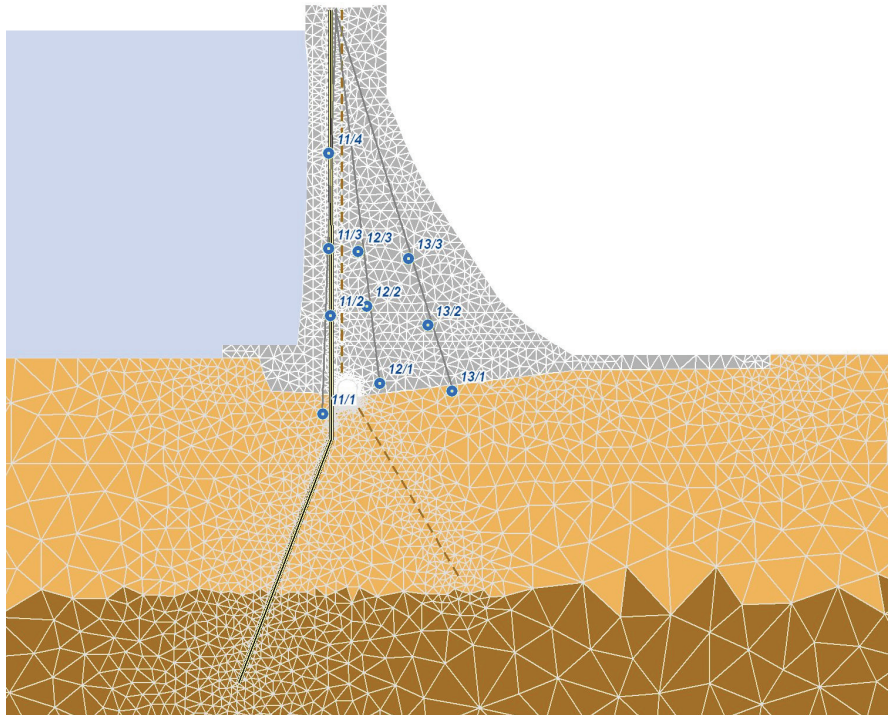


Bild 6: FE-Netz (Ausschnitt), Diemelstaumauer mit Injektionsschleier und Drainagebohrungen sowie Lage der Druckaufnehmer

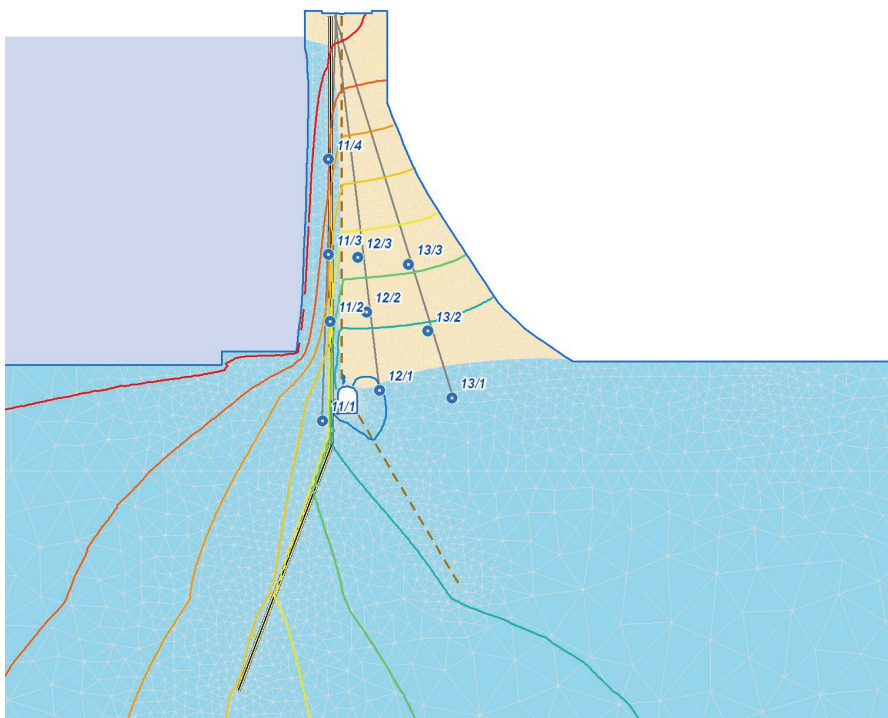


Bild 7: 2D-FE-Strömungsberechnung. Blau unterlegt sind wassergesättigte Bereiche. Farbige Linien: Äquipotentiallinien im Abstand $\Delta h = 5 \text{ m}$

Randbedingungen

Die maßgebende Randbedingung für die Durch- und Unterströmung der Staumauer ist der Wasserstandsunterschied vor und hinter der Mauer. Eine zusätzliche Randbedingung ergibt sich durch den Sickerwasseraustritt in das Dränagesystem. Der Sickerlinienaustritt wird über eine bedingte Randbedingung abgebildet, bei der innerhalb der Iterationsschleife zwischen geschlossenem (no-flow) Modellrand und, bei Erreichen von Vollsättigung, in eine Dirichlet-Randbedingung (mit Potential entsprechend der geodätischen Höhe) umgeschaltet wird.

Die Zuströmung zu den Dränagenbohrungen erfolgt in der Realität räumlich und nicht eben, wie im vereinfachten 2D-Modell berechnet. Derzeit werden verschiedene Ansätze verfolgt, um diese 3D-Effekte im ebenen 2D-Modell zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse einer 2D-Strömungsberechnung der Diemelstaumauer sind in Bild 7 dargestellt. Blau unterlegt sind wassergesättigte Bereiche. An den Potentiallinien sind der konzentrierte Potentialabbau im Bereich des Dichtungsschleiers und die Entlastungswirkung im Bereich des Kontrollgangs und der Dränagebohrungen deutlich erkennbar.

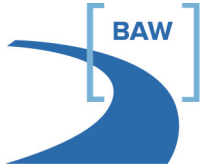
5 Vorläufige Ergebnisse

Eine Überprüfung der in beiden Staumauern gemessenen Porenwasserdrücke ergab, dass die installierten Absolutdruckaufnehmer größtenteils funktionstüchtig sind. Diese zeichnen, je nach ihrer Einbaulage, entweder Wasserdrücke oder, wenn sich ihre Einbaulage oberhalb des wassergesättigten Bereiches (Sickerlinie) befindet, den Luftdruck auf.

Eine Durchströmung der Diemelstaumauer wird durch den bis tief in den Untergrund reichenden Dichtungsschleier und die dahinter angeordnete vertikale Dränage weitgehend verhindert. Zusätzlich wird der Sohlwasserdruck durch die vom Kontrollgang aus angeordneten Dränagen reduziert. Durch diese Maßnahmen (Sicherungselemente) wird die Standsicherheit der Staumauer deutlich verbessert. Aufgrund der bisher durchgeführten Porenwasserdruckmessungen ist von einer Funktionsfähigkeit der Sicherungselemente auszugehen.

Leider lässt sich aus den an den bestehenden Messstellen aufgezeichneten Porenwasserdrücken die Wassersättigung (bzw. Durchströmung) der Staumauer sowie die Wasserdruckverteilung an der Bauwerkssohle nur ungenau rekonstruieren, so dass die ursprünglich anvisierte Parameterbestimmung allein auf Basis der gemessenen Porenwasserdrücke nicht möglich ist. Derzeit werden die gemessenen, aus den Dränagen im Kontrollgang anfallenden Sickerwassermengen sowie die Temperaturmessungen ausgewertet, mit dem Ziel die Modellparameter, insbesondere die Bauwerksdurchlässigkeit, eindeutiger bestimmen zu können.

Trotz der Unsicherheiten bei der Wahl der Durchlässigkeitseigenschaften und der derzeit noch nicht konsistenten Abbildung der Zuströmung im Bereich der Vertikaldränagen, liefern die Modellergebnisse (Bild 7) eine gute Vorstellung der Strömungsverhältnisse im Bauwerk. Beispielsweise weisen die berechneten Potentiale luftseitig des Dichtungsschleiers einen Verlauf auf, der dem der hier durchgeführten Messungen (Bild 3) weitgehend entspricht. Die hier gemessenen Wasserstandsganglinien entsprechen hier, in Abhängigkeit von der Lage der Druckaufnehmer mehr oder weniger gedämpft, der Seewasserstandsganglinie. Ein Großteil der installierten Druckaufnehmer zeichnet in beiden Bauwerken jedoch lediglich Luftdruckschwankungen auf. Diese Instrumente befinden sich, wie in Bild 7 zu sehen, im nicht wassergesättigten Bereich oberhalb der Sickerlinie. Wären diese Druckaufnehmer im Bereich der Bauwerkssohle angeordnet, könnten die Höhe des wassergesättigten Bauwerksbereiches sowie die Porenwasserdruckverteilung an der Bauwerkssohle besser bestimmt werden. Für das zu erstellende Messkonzept ergeben sich hieraus erforderliche Modifikationen gegenüber der bisherigen Anordnung der Druckaufnehmer.



Literatur

- Bettzieche, V. (2004): Mathematisch-statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. *Wasserwirtschaft*, 94, 2004, Heft 1 – 2.
- DIN 19700: 2004-07: Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen - Teil 11: Talsperren; Beuth Verlag, Berlin.
- Montenegro, H. (1995). Parameterbestimmung und Modellierung der Wasserbewegung in heterogenen Böden. Dissertation an der Universität Karlsruhe. VDI-Fortschritt-Berichte: Reihe 15: Umwelttechnik; Nr. 134.
- Tönnis, B. (2002): Zuverlässigkeitsanalyse für die Staumauer der Diemeltalsperre. Dissertation an der RWTH. Auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.