

Der Standsicherheitsnachweis von Staumauern mittels gekoppelter FE-Modelle

Volker Bettzieche
Entwicklungsabteilung Talsperren, Ruhrverband, Essen

1 Zusammenfassung

Die Wasserversorgung des Ballungsraumes Ruhrgebiet wird durch die Talsperren des Ruhrverbands gesichert. Fünf dieser Talsperren werden von Staumauern aufgestaut, die älter als 80 Jahre sind. Der Nachweis der Standsicherheit der Staumauern erfolgte zur Bauzeit mit Hilfe von einfachen Berechnungsansätzen, die nicht mehr dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Zudem sind seither eingetretene Veränderungen zu berücksichtigen. Mit Hilfe der FEM werden daher die Standsicherheitsnachweise neu geführt. Sie verwenden Messergebnisse, die während der Betriebszeit gesammelt wurden, zur Kalibrierung entsprechender Strömungs- und Wärmeflussmodelle. Das Bauwerksverhalten der alten Staumauern kann so mit Hilfe gekoppelter FE-Modelle wesentlich realitätsnäher beschrieben und die Standsicherheit nachgewiesen werden.

2 Problemstellung bei alten Gewichtstaumauern

Die überregionale Wasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft an der Ruhr ist Aufgabe des Ruhrverbands. Er sorgt dafür, dass die Ruhr den vielfältigen Anforderungen als Wasserlieferant für mehr als 5 Millionen Menschen gerecht wird. Durch den Betrieb von neun Talsperren sorgt der Ruhrverband für eine ausreichende Wasserführung und die Milderung von Hochwassersituationen. Fünf seiner Talsperren werden durch Gewichtstaumauern eingestaut, die zwischen 1903 und 1913 errichtet wurden und zwischen 30 und 50 m hoch sind. Die Bauweise dieser Staumauern beruht auf einem Konzept von Prof. Intze. Sie weisen u.a. folgende Gemeinsamkeiten auf:

- Mauerwerk aus Bruchsteinen in monolithischer Bauweise, also ohne Längs- oder Quertfugen,
- Mauerkörper mit dreiecksförmigen Querschnitt und Ausweitung im Kronenbereich, im Grundriss gekrümmt,
- auf der Wasserseite der Mauer aufgetragener Dichtungsputz - an der oberen Hälfte geschützt durch ein Vorsatzmauerwerk, an der unteren Hälfte geschützt durch eine Vorschüttung, den sog. Intze-Keil - sowie
- im Mauerkörper Drainagerohre aus Ton zur drucklosen Abführung evtl. auftretenden Sickerwassers.

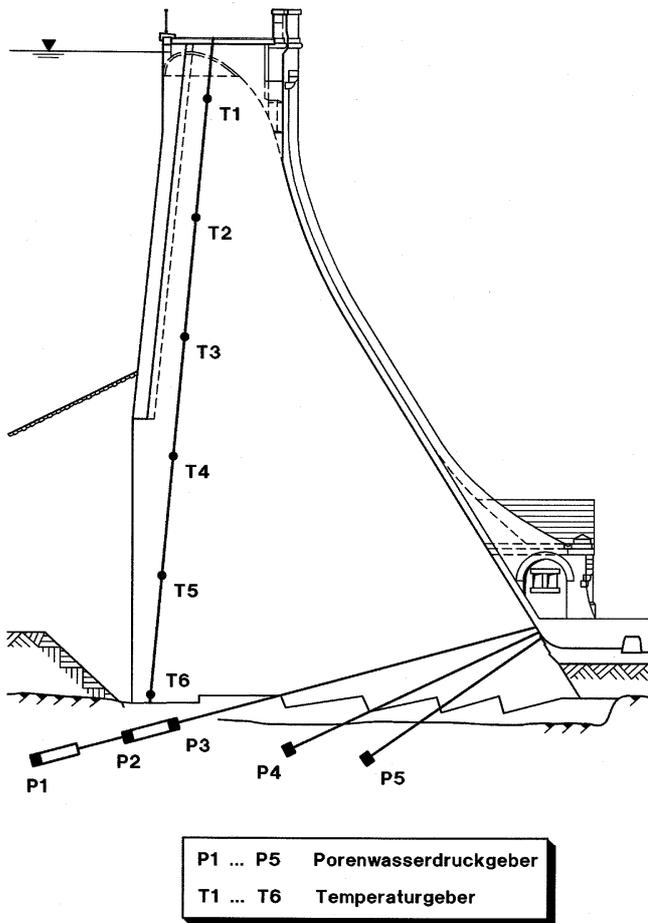


Bild 1: Anordnung der Porenwasserdruckgeber und Temperaturfühler an der Staumauer der Fürwiggeltalsperre

auftraten, die in der ursprünglichen Statik nicht berücksichtigt worden waren. Die Nachweis der Standsicherheit unter diesen Veränderungen war unumgänglich.

Aufgrund dieser Konstruktionsprinzipien war es möglich, den Standsicherheitsnachweis an einem repräsentativen Mauerquerschnitt in einfacher Form zu führen. Da die Staumauer als trocken galt, konnte die horizontale Belastung des Wasserkörpers als äußere Last angesetzt werden. Die Überlagerung mit dem ebenfalls horizontal wirkenden Erd- druck des Intzekeils sowie dem vertikal wirkenden Eigengewicht der Mauer führte zu Gleichgewichtsbetrachtungen entlang von horizontalen Schnitten durch die Staumauer. Der Standsicherheitsnachweis wurde als Nachweis der Randspannungen bei rechteckigem Querschnitt geführt.

Im Laufe der langen Betriebszeit ließ jedoch bei allen Intze- Staumauern die dichtende Wirkung des wasserseitigen Putzes nach. Gleichzeitig versinterten die Drainagen oder wurden durch Verpressung des Mauerkörpers verschlossen. Infolgedessen kam es zur Durchströmung des Mauerkörpers und somit zu zusätzlichen Kräften im Mauerkörper. Außerdem zeigte sich, dass auch im Untergrund Wasserdruckkräfte

3 Nachweis der Standsicherheit nach den aaRdT

Nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (aaRdT) ist der Standsicherheitsnachweis für eine Staumauer nach DIN 19700, Teil 11 zu führen. Weitergehende Erläuterungen zur Vorgehensweise können dem Merkblatt 242 des DVWK [5] entnommen werden.

Die DIN 19700 wird z.Zt. überarbeitet und soll noch dieses Jahr im Gelbdruck erscheinen. In dieser neuen Fassung wird die in der alten Norm enthaltene getrennte Betrachtung des Bauwerks und des Untergrundes aufgehoben. Stattdessen wird gefordert schon durch die Planung die konstruktive Einheit von Absperrbauwerk und Untergrund

sicherzustellen. Absperrbauwerk und Untergrund bilden somit ein gemeinsames Tragwerk für die sämtliche Nachweise zu führen sind.

So sind auch die Belastungen für das Gesamttragwerk anzusetzen. Einen Überblick über die für Staumauern anzunehmenden Lasten gibt die folgende Tabelle der DIN (s. Tabelle 1).

Einwirkungen		Lastfallkombinationen								
		LF 1		LF 2				LF 3		
		a	b*)	a	b	c	d	a	b	c
Gruppe 1	Eigenlast	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Verkehrs- und Auflast	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Wasser- und Strömungsdruck bei Vollstau	×			×	×	×		×	×
	Erddruck	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	langfristige Temperatureinwirkung	×	×	×	×	×	×	×		×
	Kriechen und Schwinden des Betons	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Gruppe 2	Wasser- und Strömungsdruck bei höchstem Stauziel Z_{H1}			×						
	Eisdruck und Windlast				×					
	Bau- und Reparaturlasten					×				
	Betriebserdbeben						×			
Gruppe 3	Wasser- und Strömungsdruck bei höchstem Stauziel Z_{H2}							×		
	seltene Temperatureinwirkungen								×	
	Sicherheitserdbeben									×
*) Bauzustände sowie Lastfall "leeres Becken"										

Tabelle 1: Lastfallkombinationen nach DIN 19700-11, Gelbdruck 1999

Für die statische Berechnung werden zudem Kennwerte benötigt, die die Verformbarkeit, Festigkeit, Durchlässigkeit und den allgemeinen Zustand von Bauwerk und Untergrund beschreiben. Diese Kennwerte können in der Regel nur in Streubereichen angegeben werden. In Abhängigkeit von der Weite der Streubereiche werden drei Tragwerkszustände betrachtet:

Tragwerkszustand A (wahrscheinlicher Zustand) für gesicherte oder allgemein anerkannte Kennwerte (entweder genormt, z. B. in DIN 1055, oder durch Versuchsergebnisse festgelegt oder aus Erfahrung sicher abgeschätzt)

Tragwerkszustand B (wenig wahrscheinlicher Zustand) für ungünstige Kennwerte innerhalb gesicherter Streubereiche

Tragwerkszustand C (unwahrscheinlicher Zustand) für ungünstige Kennwerte in Grenzbereichen

Aus der Kombination der Lastfälle und Tragwerkszustände ergeben sich die Bemessungsfälle (s. Tabelle 2).

Lastfall	Bemessungsfälle für Tragwerkszustand		
	A	B	C
1	BF I	BF II	BF III
2	BF II	BF III	-
3	BF III	-	-

Tabelle 2: Bemessungsfälle nach DIN 19700-11, Gelbdruck 1999

Beim Nachweis der Staumauern sind in der Regel folgende Nachweise maßgebend:

- Nachweis einer klaffenden Fuge;
- Nachweis der zulässigen Hauptdruckspannung;
- Nachweis der Kraftübertragung in Fugen des Bauwerkes, der Aufstandsfläche und Trennflächen des Untergrundes.

Klaffende Fugen können rechnerisch im Mauerkörper entstehen, da hier Zugspannungen parallel zur Bauteiloberfläche und rechtwinklig zu den Arbeitsfugen nicht zulässig sind. Für sie gilt als Bemessungskriterium:

- Klaffende Fugen an der Wasserseite der Staumauer und im Untergrund sind im Bemessungsfall I auszuschließen.
- Im Bemessungsfall II sind klaffende Fugen nur kurzzeitig und nur in engen Bereichen zugelassen.
- Im Bemessungsfall III - sowie im Bemessungsfall II mit Betriebserdbeben - sind klaffende Fugen im allgemeinen bis zur Mauermitte zugelassen.

4 Rechnerische Berücksichtigung von Bruchmechanismen

Das benutzte Rechenprogramm GEOFIN erlaubt die Untersuchung von Spannungs- und Verformungszuständen im räumlichen Kontinuum. Als Grundelement wird ein Tetraeder verwendet, der programmintern zu quaderförmigen Raumelementen zusammengesetzt wird. Zur Ermittlung der unbekanntenen Knotenpunktverschiebungen wird ein linearer Ansatz für den Verlauf der Verschiebungen innerhalb des Elements zugrundegelegt. Dies entspricht einem konstanten Verzerrungs- und Spannungszustand innerhalb eines Elements.

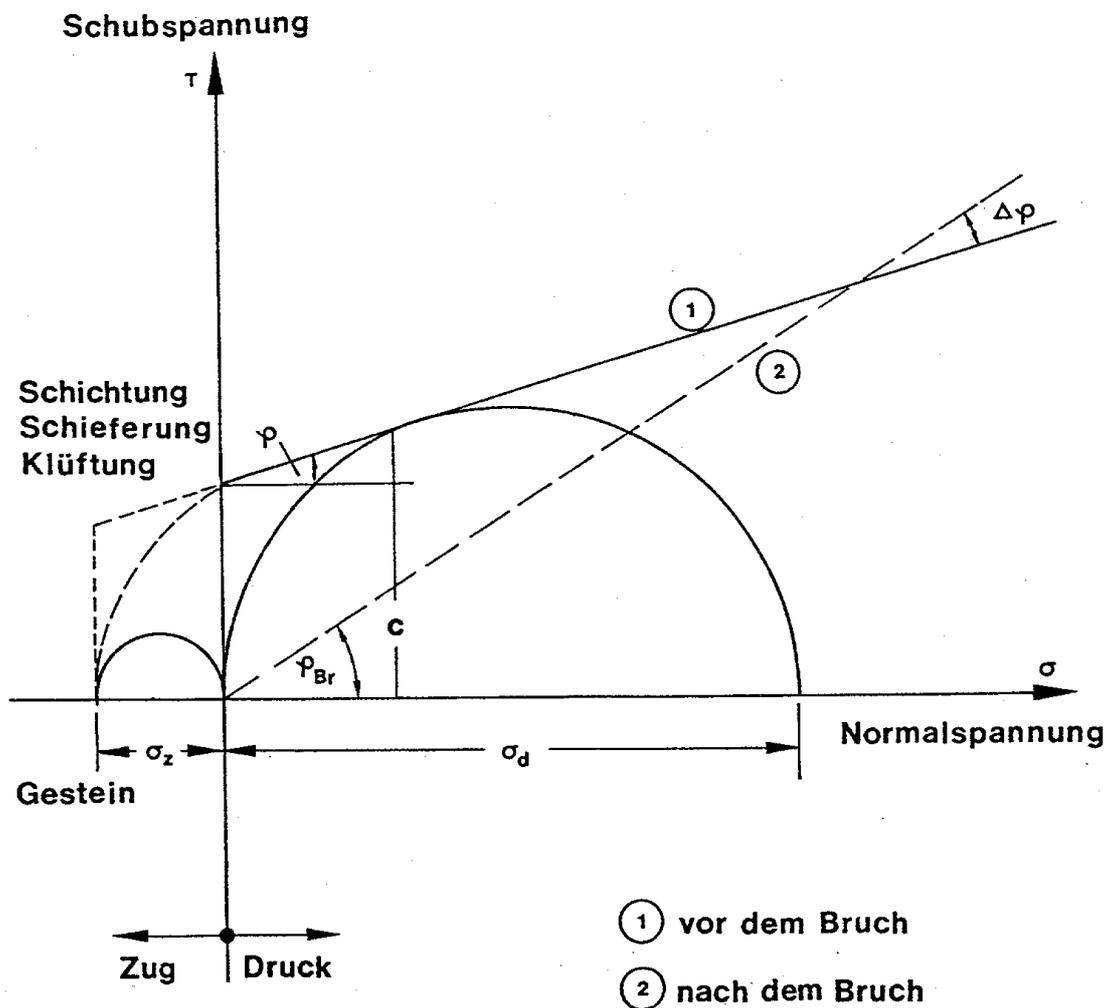


Bild 2: Mohr – Colomb'sches Diagramm

Das Spannungsdehnungsverhalten geht von der Annahme eines bilinearen, d. h. elastisch-plastischen Stoffgesetzes aus, wodurch die Berücksichtigung von Festigkeitsüberschreitungen ermöglicht wird. Es können also für jedes Material Festigkeiten (Zugfestig-

keit, Scherparameter und Mohr-Coulombsches Bruchkriterium) vorgegeben werden. Wird nun in einem Tetraeder ein räumlicher Spannungszustand ermittelt, der mit den Festigkeitsbedingungen nicht verträglich ist, so wird rechnerisch ein Bruch simuliert mit der Folge, dass dieses Tetraeder diese Beanspruchungen entweder nicht mehr (z. B. nach einem Zugbruch) oder nur noch in eingeschränkter Weise (z.B. über eine Restscherfestigkeit bei einem Schubbruch) tragen kann. Die nach dem Bruch nicht mehr aufnehmbaren Spannungen werden iterativ auf Nachbarbereiche umgelagert. Dabei werden Knotenkräfte ermittelt, welche den nach dem Bruch nicht mehr aufnehmbaren Spannungen entsprechen. Die Knotenkräfte, welche in der Summe im Gleichgewicht stehen und an den Ecken des 'gebrochenen' Elements angreifen, belasten die Umgebung der Bruchstelle zusätzlich. Sie simulieren also, dass das 'gebrochene' Element vollständig oder teilweise im Tragverhalten ausfällt. Mit diesen zusätzlichen inneren Kräften wird das ganze System von Neuem durchgerechnet. Auf diese Weise lässt sich die Entwicklung plastischer Zonen verfolgen. Dieses Verfahren wird auf die für jedes Element errechneten Hauptspannungen angewendet. Es ist jedoch gleichfalls möglich, Ebenen verminderter Festigkeit, z. B. beliebig orientierte Trennflächen (z. B. Klüfte) zu definieren, für welche dieses Verfahren analog angewendet werden kann.

Nach Abschluss des Iterationsprozesses erhält man die gesuchten Knotenpunktverschiebungen, aus denen sich die Spannungen im jeweiligen Element berechnen lassen (elastisch oder abgemindert, wenn Festigkeitsüberschreitungen eingetreten sind). Ausgegeben werden die drei Hauptspannungen mit den zugehörigen Richtungswinkeln und die den Koordinatenachsen parallelen Normal- und Schubspannungen.

5 Nachweisführung am Beispiel der Fürwiggetalsperre

Die neue Nachweisführung soll am Beispiel der Fürwiggestaumauer gezeigt werden. Die in den Jahren 1902 bis 1904 errichtete Talsperre gehört zu den ersten Talsperren, die nach Plänen von Prof. Intze im Einzugsgebiet der Ruhr errichtet wurden. Mit einer Stauoberfläche von 17,7 ha und einem Stauinhalt von 1,67 hm³ gehört sie nach heutigem Maßstab zu den kleinen Talsperren. Um genauere Informationen über das Verhalten der Staumauer zu erhalten, erweiterte der Ruhrverband 1986 die zur Überwachung der Mauer bereits vorhandene Messeinrichtung wesentlich. Neben verschiedenen weiteren Messeinrichtungen [3] wurden in die Mauer Temperaturmesseinrichtungen und Porenwasserdruckgeber eingebaut (s. Bild 1). Anhand der Messergebnisse sollte die Situation des Bauwerks beurteilt und der Standsicherheitsnachweis geführt werden [2].

Nach 10 Jahren Beobachtung wurden nun die Messergebnisse analysiert, wobei in drei Bereichen die FEM eingesetzt wurde:

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

5.1 Strömungsmodell

Die hydraulische Situation innerhalb der Fürwiggestaumauer und im Felsuntergrund wird seit 1986 mit Hilfe von Wasserstandsmessungen in Bohrungen und Porenwasserdruckgebern überwacht. Die insgesamt fünf Porenwasserdruckgeber wurden in drei Bohrungen eingebaut, Geber P1 vor dem wasserseitigen Mauerfuß, Geber P2 und P3 nahe dem wasserseitigen Mauerfuß und die Geber P4 und P5 im mittleren Bereich der Mauersohle. Der Zwischenraum in den Bohrungen wurde sorgfältig verpresst.

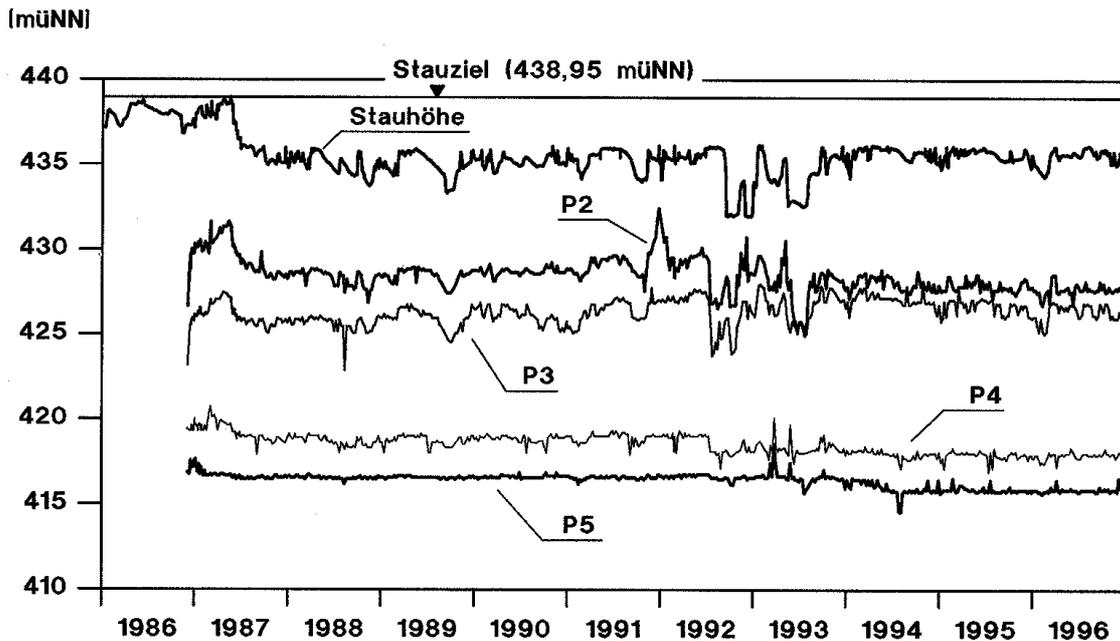


Bild 3: Stauhöhe sowie Messwerte der Porenwasserdruckgeber P2 bis P5

Trotzdem lieferte der Geber P1 von Anfang an unerklärliche Werte, die auf eine hydraulische Verbindung zum Geber P2 schließen lassen. Die Messwerte der Geber P2 bis P5 sind hingegen plausibel. Die Gegenüberstellung der Messwerte mit der Stauhöhe der Talsperre in Bild 3 zeigt, dass die Porenwasserdrücke im Sohlbereich der Staumauer auf Stauhöhenänderungen reagieren. Die Amplitude der Änderungen nimmt, wie auch der Druck von der Wasser- zur Luftseite der Staumauer ab. Setzt man die gemessenen Porenwasserdrücke in Bezug zur Stauhöhe, so ergibt sich ein enger Zusammenhang (s. Tabelle 3). Die jeweiligen Verhältniswerte λ_i zwischen dem Druck an den Messstelle i und der Stauhöhe sind dabei praktisch konstant. Mit einer nur geringen Standardabweichung von 3 % steht an der Messstelle P2 72% des Wasserdrucks an, der der Wassersäule in der Talsperre entspricht. Dieser Druck reduziert sich entlang der Mauersohle auf 26% in Mauermitte.

	Einheit	Stauhöhe	P1	P2	P3	P4	P5
Anzahl Messwerte		589	450	573	575	572	572
Mittelwert	m ü. NN	435,45	428,22	428,53	426,29	418,58	416,44
Standardabweichung	m	1,17	0,63	1,00	0,73	0,60	0,41
Mittelwert des Verhältniswerts l_i P_i zur Stauhöhe	%		72	72	63	33	26
Standardabweichung hierzu	%		1,7	2,9	3,1	2,0	1,8
Für die Kalibrierung gewähltes l_i	%			77	70	40	30

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Druckmessungen an den Messstellen P1 bis P5 zur Stauhöhe

Material	Ausgangswert	kalibrierter Wert
Mauerwerk Mauerkörper	10^{-6} m/s	10^{-6} m/s
Mauerwerk Vorsatzmauerwerk	10^{-5} m/s	10^{-5} m/s
Intzekeil	10^{-5} m/s	$2 \cdot 10^{-6}$ m/s
Fels bis 1,8 m Tiefe (unter wassers. Mauerhälfte)	10^{-6} m/s	$2 \cdot 10^{-6}$ m/s
Fels bis 1,8 m Tiefe (unter luftseitiger Mauerhälfte)	10^{-6} m/s	$2 \cdot 10^{-5}$ m/s
Fels unter 1,8 m Tiefe	10^{-7} m/s	10^{-7} m/s

Tabelle 4: Durchlässigkeitsbeiwerte

Diese Ergebnisse der langjährigen Beobachtungen konnten anhand weiterer Messungen verifiziert werden. Für die Kalibrierung des Strömungsmodells wurde (auf der sicheren Seite liegend) die Abminderung des Wasserdrucks geringer angesetzt. Der Abminderungsbeiwert wurde entsprechend der oberen der 5%-Fraktile der Beobachtungen gewählt.

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. Bei der Eichung des Strömungsmodells zeigte sich, dass die gemessenen Drücke nur dann im Modell abgebildet werden

konnten, wenn dem Intzekeil eine Dichtwirkung zugeordnet wurde. Gleichzeitig zeigte sich, dass der obere Felshorizont unter der luftseitigen Mauerhälfte durchlässiger sein mußte, als der Fels unter der wasserseitigen Hälfte. Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden nur global für die verschiedenen Materialien geändert. Eine elementweise Abstimmung wurde nicht durchgeführt, da das Modell eine globale Aussage für die gesamte Staumauer treffen sollte.

Mit Hilfe des geeichten Modells konnte die Durchströmungssituation für unterschiedliche Stauhöhen (s. Bild 4), einschließlich verschiedener Hochwasserszenarien berechnet werden.

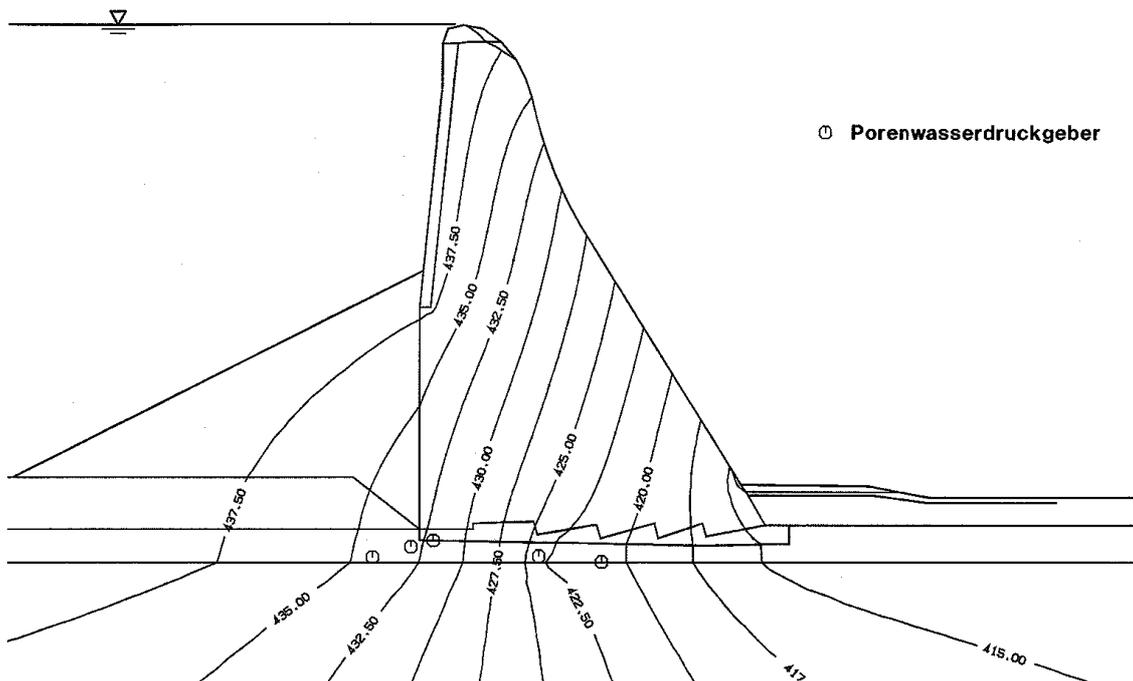


Bild 4: Isoglenen der Standrohrspiegelhöhen bei Vollstau

5.2 Wärmeflußmodell

Die Bauwerkstemperaturen in der Fürwiggemauer werden in zwei Bohrungen gemessen, die von der Mauerkrone aus in die Stamauer abgeteuft wurden. Je Bohrung sind 6 Temperaturfühler angeordnet (s. Bild 1). Die Temperaturen werden wöchentlich abgelesen, gleichzeitig wird die Lufttemperatur gemessen. Die Wassertemperaturen in der Talsperre werden monatlich je nach jahreszeitlichem Temperaturprofil in bis zu 22 verschiedenen Tiefen gemessen.

Die Wassertemperaturen wechseln im Jahresgang zwischen einer homogenen Temperaturverteilung und einem temperaturmäßig geschichteten Wasserkörper. Ausgehend von einer im Winter gleichmäßigen Wassertemperatur von etwa 4 °C führt nach der Frühjahrszirkulation die Erwärmung der oberflächennahen Schicht im Frühsommer zu

einer ersten Schichtung des Wasserkörpers, die sich bis zum Spätsommer immer deutlicher ausprägt. Die Wassertemperaturen der oberen Schichten liegen dann bei 20 °C, am Grund bei 10 bis 15 °C. Aufgrund sinkender Lufttemperaturen und durch die von stärkeren Winden verursachte Herbstzirkulation kühlt der Wasserkörper bis Dezember wieder gleichmäßig ab.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen an drei Messstellen der Bohrung 1 sind in Bild 5 dargestellt. Von der Krone nach unten nehmen die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen deutlich ab und sind im Sohlbereich kaum mehr festzustellen. Gleichzeitig verschiebt sich das Maximum der Kurven, das an der Krone etwa im August auftritt, bis in den Februar/März des folgenden Jahres an den unteren Messfühlern.

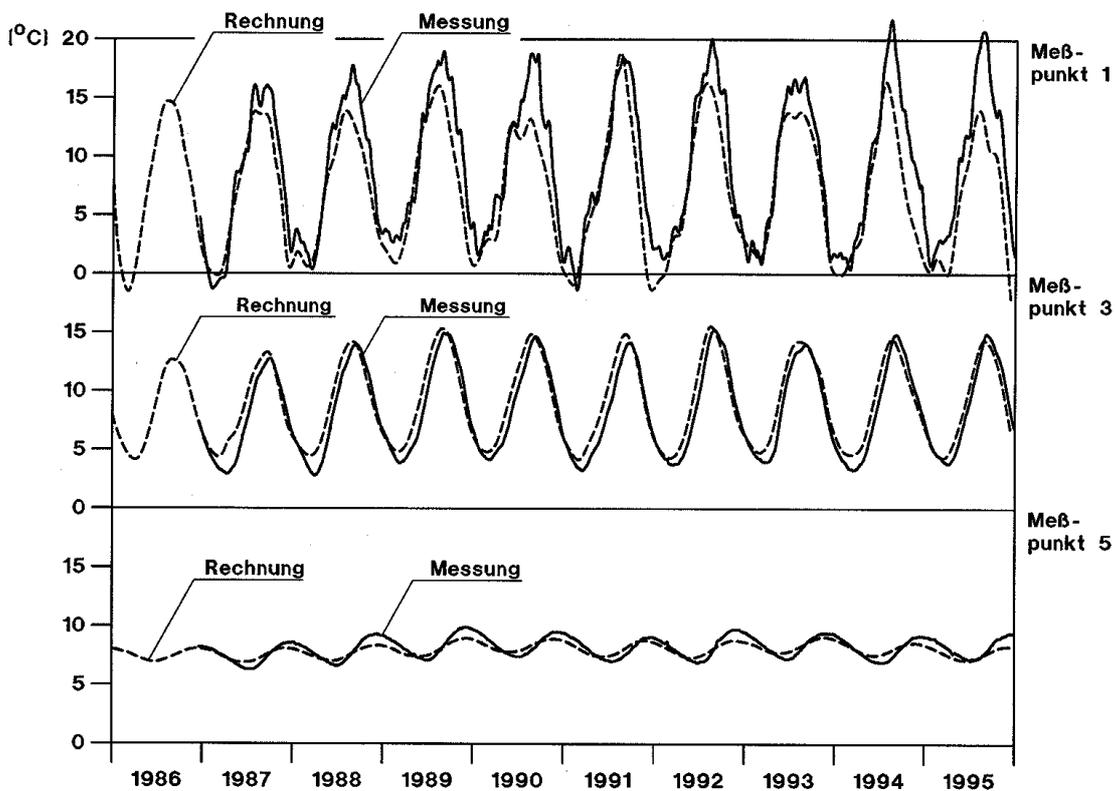


Bild 5: Messergebnisse der Temperaturfühler 1, 3 und 5 sowie Ergebnisse der instationären FE-Rechnung

Die Berechnung des Wärmeflusses in Bauwerken erfolgt wie die Sickerströmungs Berechnungen mit Hilfe der Differentialgleichungen von Laplace. Diese Analogie konnte benutzt werden, um das Grundwassersimulationsprogramm SICK100 [4] zur Berechnung des instationären Wärmeflusses zu verwenden.

Zur Berechnung des Temperaturflusses 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 be-

kannt waren, mußten die speziell zur Berechnung des Wärmeflusses benötigten Materialdaten der Literatur entnommen werden. Bei der Kalibrierung (Eichung) des Modells wurden diese Materialkonstanten als Startwerte benutzt und solange verändert, bis ein akzeptables Ergebnis vorlag (s. Tabelle 5).

Material	Dichte	Wärmeleitfähigkeit		Wärmekapazität	
		Startwert	geeichter Wert	Startwert	geeichter Wert
Einheit	g / cm ³	W / (m * K)	W / (m * K)	kJ / (kg * K)	kJ / (kg * K)
Mauerwerk	2,30	2,55	3,32	1,01	0,71
Fels	2,40	2,30	3,00	0,71	0,43
Intzekeil	2,10	1,00	1,20	1,72	1,38

Tabelle 5: Materialwerte bei der Simulation des Wärmeflusses

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. Zum Beispiel konnten Bereiche der Mauer, die im Winter bei Vollstau durch das Wasser bedeckt wurden, im Sommer bei niedrigerem Stauspiegel durch die Lufttemperatur beeinflusst werden.

Die Nachrechnung der Temperaturverhältnisse in der Mauer erfolgte über 10 Jahre mit einer zeitlichen Schrittweite von einem Monat, so dass 120 Rechnungen erforderlich waren. Für jeden Rechenschritt (Monat) konnten anschließend die Temperaturfelder im Inneren der Mauer ausgegeben werden. Zusätzlich bestand die Möglichkeit, zeitliche Ganglinien der Temperaturen für jeden beliebigen Punkt in der Mauer zu ermitteln. Zum Vergleich mit den gemessenen Werten wurden die Messfühler durch FE-Knoten im Modell abgebildet. Deren berechnete Ganglinien konnten nun mit den gemessenen Ganglinien verglichen werden (s. Bild 5).

Nach dem ersten Rechenlauf zeigte sich erwartungsgemäß eine Diskrepanz zwischen Rechen- und Messwerten. Im weiteren Verlauf der Eichung wurden daher die thermischen Materialkonstanten (s. Tabelle 5, Startwert) variiert, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht war. Die Materialkonstanten wurden wie beim Strömungsmodell nur global für die drei Materialien geändert. Als Ergebnis der Eichung wurden die in Tabelle 5 angegebenen Materialkonstanten (geeichter Wert) ermittelt.

Die an den Messpunkten errechneten Temperaturganglinien zeigen eine deutliche Übereinstimmung mit den Ganglinien der Messwerte (s. Bild 5). Beide Kurven weisen gleichartige Amplituden auf. Auch die zeitliche Verzögerung des Maximums, die bei den Messungen festgestellt wurde, wird vom Modell wiedergegeben. Die geeichten Materialwerte weichen nur um 30 % von den in der Literatur angegebenen Werten ab. Der Unterschied kann einerseits auf der natürlichen Bandbreite dieser Werte beruhen oder implizit weitere Einflüsse, wie z.B. einen zusätzlichen Wärmetransport durch das Sickerwasser, repräsentieren. Die Übereinstimmung der Ganglinien zeigt jedoch, dass die wesentliche Wirkung des Wärmetransports erfaßt wurde.

Für die Beurteilung des Bauwerksverhaltens ist nicht nur die Nachrechnung von vergangenen Ereignissen von Bedeutung. Beim Nachweis der Standsicherheit werden Aussagen über fiktive Temperaturereignisse benötigt, deren Szenarien mit einem Modell simuliert werden können.

Für die Fürwiggestaumauer wurden zwei Szenarien simuliert:

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

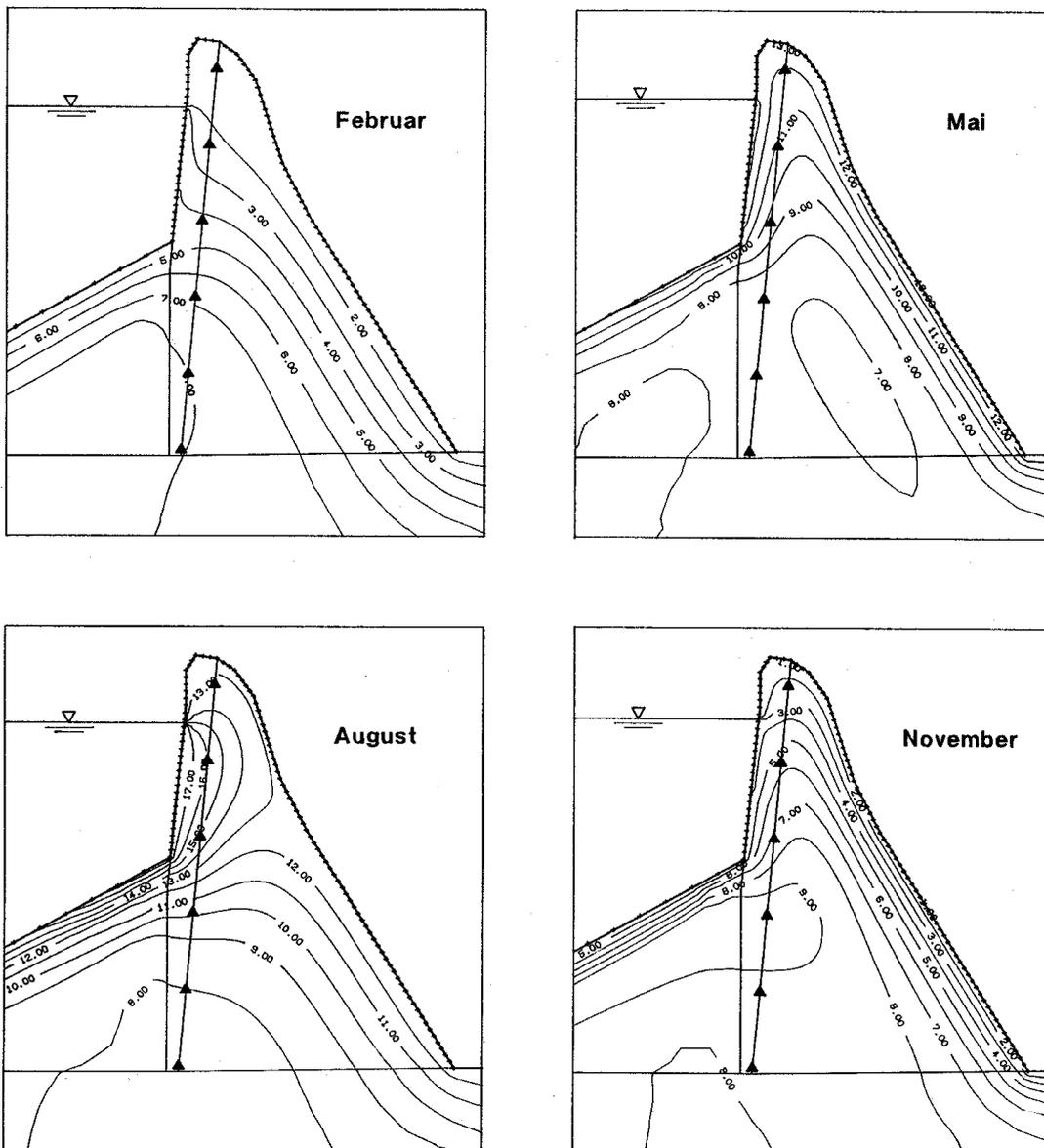


Bild 6: Temperaturfelder in der Staumauer im mittleren Jahresgang

Bei der Simulation des mittleren Jahresgangs (s. Bild 6) ist der Mauerkörper im Februar nach drei Monaten mit einer Außentemperatur von etwa 0 °C weitgehend ausgekühlt. Die Isothermen des Temperaturfelds verlaufen parallel zur luftseitigen Außenkante, die Temperatur steigt von dort bis zur Mauermitte etwa linear an. Am wasserseitigen Mauerfuß herrscht noch eine Temperatur von 8 °C. Frost tritt im Mauerkörper nicht auf. Bis zum Mai steigt die mittlere Lufttemperatur an. Hierdurch erwärmen sich die äußeren Mauerbereiche deutlich. In Mauermitte entsteht eine „Kälteinsel“ von 7 °C. Der untere Messfühler am wasserseitigen Mauerfuß erreicht erst jetzt sein Temperaturminimum. Bis zum August ist der Mauerkörper vollständig durchwärmt. Die Temperaturverteilung des Winters hat sich in der unteren Hälfte der Mauer umgekehrt. Die Temperaturen fallen nun von etwa 13 °C an der Luftseite auf immer noch 8 °C am wasserseitigen Mauerfuß. Hier ändern sich die Temperaturen, geschützt durch den Intzekeil, im Jahresgang praktisch nicht. Interessant ist das Temperaturfeld im Bereich der oberen Wasserteile der Talsperre. Hier hat sich das Wasser im Sommer auf 18 °C erwärmt und „heizt“ weiterhin die Mauer auf. Es entsteht ein dem unteren Mauerbereich entgegengesetztes Temperaturgefälle von der Wasser- zur Luftseite. Im November ist die Lufttemperatur bereits wieder auf wenige Grad Celsius abgefallen. Im Inneren der Mauer herrschen noch 8 bis 9°C, so dass sich von der Luftseite her ein deutlicher Gradient einstellt. Bis zum Februar wird sich hierdurch besonders der obere Mauerkörper wieder deutlich abkühlen.

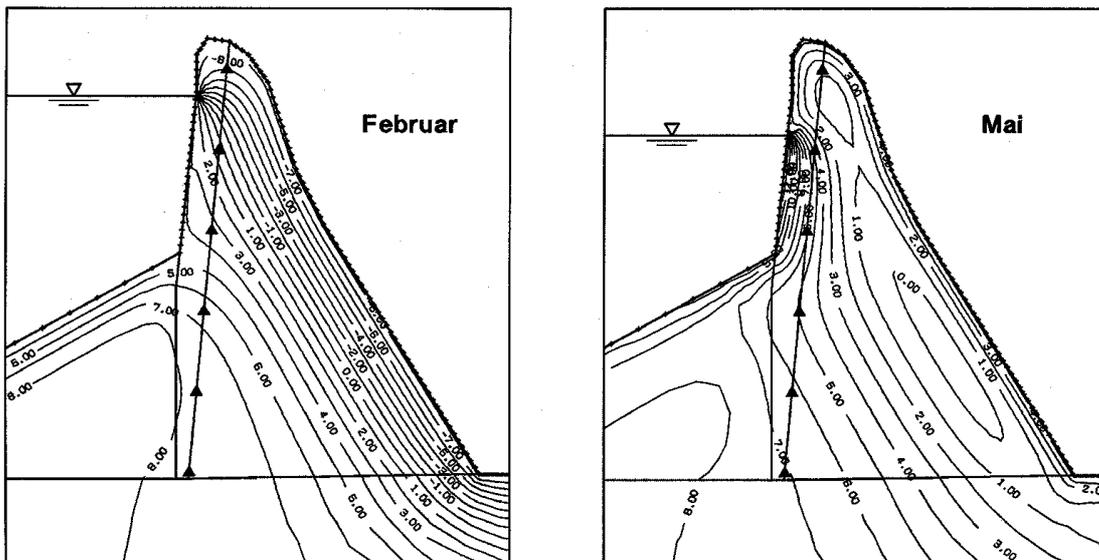


Bild 7: Temperaturfelder in der Staumauer in und nach einem extremen Winter

Bei der Berechnung des seltenen Temperaturereignisses (s. Bild 7) wurden von November bis März Lufttemperaturen von etwa -10 °C simuliert. Nach drei Monaten Dauerfrost ist die luftseitige Hälfte der Mauer bis zum Februar deutlich abgekühlt, die Frostgrenze 3 m tief in die Mauer eingedrungen. Der Mauerkopf oberhalb des Stauspiegels ist vollständig durchfrozen. Am wasserseitigen Mauerfuß macht sich die Kälte nur geringfügig bemerkbar. Nach Abschluss der Kälteperiode beginnt sich die Mauer im Mai

wieder zu erwärmen. Im Abstand von 2 bis 3 m zur Luftseite befindet sich aber noch eine gefrorene Kälteinsel, die nur langsam auftaut.

5.3 Mechanische Berechnung – Iteration

Bei der Berechnung der Extremlastfälle im Bemessungsfall III kommt es planmäßig zur Ausbildung von Bruchbereichen im Mauerkörper. Wie bereits im Abs. 4 beschrieben, werden die betroffenen Elemente entlastet und die Berechnung erneut durchgeführt. Diese Vorgehensweise wird wiederholt, bis sich ein stabiler Zustand eingestellt hat.

Zunächst unberücksichtigt bleibt bei dieser Vorgehensweise, dass sich durch die auftretenden Risse die hydraulische Durchlässigkeit im Bruchbereich ändert. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, werden im Anschluss an die mechanische Berechnung die Durchlässigkeiten der betroffenen Elemente erhöht und eine neue Berechnung der Hydraulik gestartet. Aufgrund der sich nun ergebenden neuen Potentialverteilung müssen auch die Strömungs- und Auftriebskräfte neu angesetzt werden, so dass eine neue mechanische Berechnung notwendig wird. Auch diese Iteration wird solange wiederholt, bis sich ein stabiler Zustand einstellt.

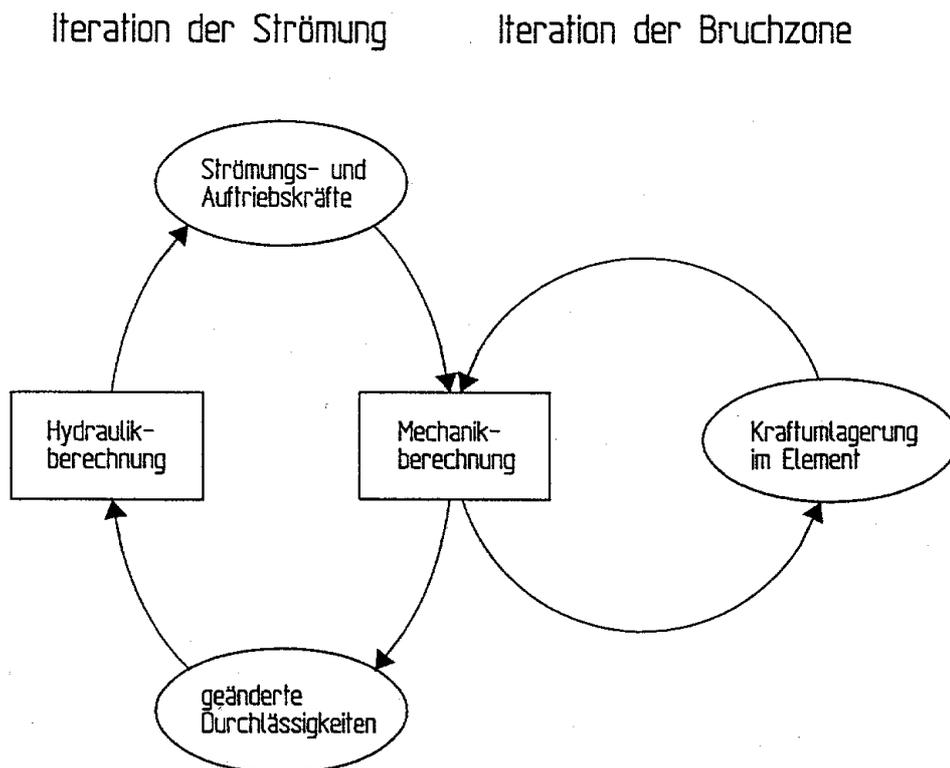


Bild 8: Iteration der Strömung und Iteration der Bruchberechnung

5.4 Standsicherheitsnachweis der Fürwiggestaumauer

Für die Fürwiggestaumauer 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. Das verwendete FE-Programm simuliert das Aufreißen der durch Zugkräfte beanspruchten Elemente, indem diese durch eine entsprechende Eigenspannung entlastet werden. Es werden an den Nachbarelementen korrespondierende Kräfte angebracht. Zusätzlich ändert sich durch den Riss 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.

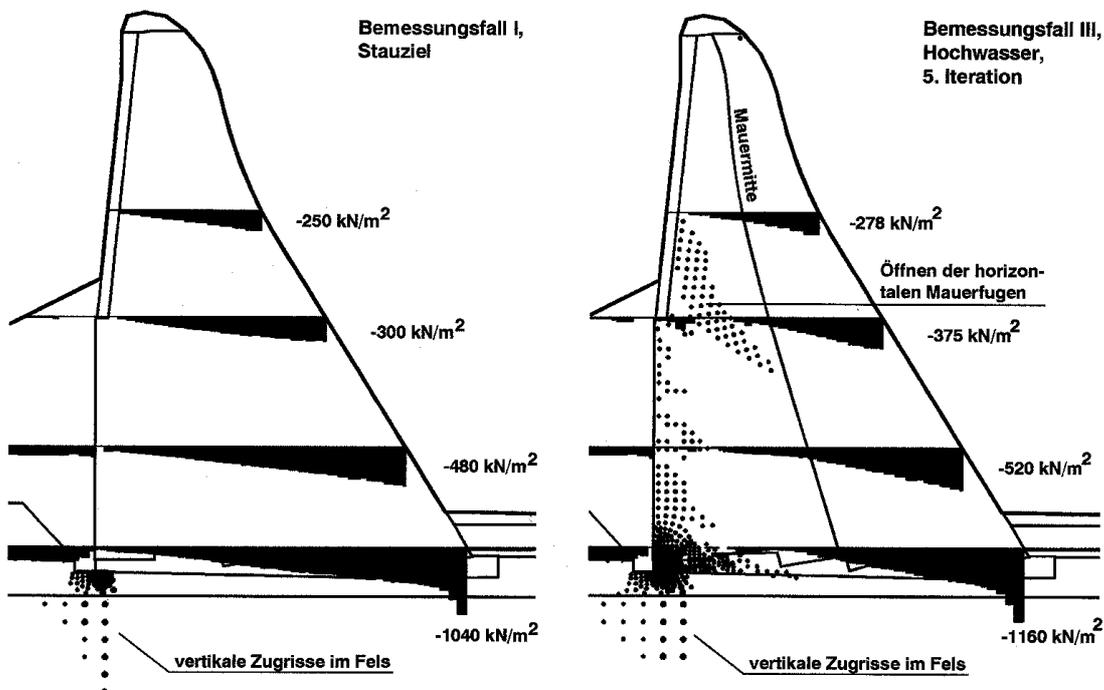


Bild 9: Vertikale Spannungen σ_z und Risszonen in der Staumauer

6 Diskussion der Ergebnisse

Der Standsicherheitsnachweis für unsere etwa 100 Jahr alten Gewichtsstaumauern konnte zur Bauzeit aufgrund vereinfachender Annahmen mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen geführt werden. Die heute zur Verfügung stehende Methode der Finiten Elemente (FEM) erlaubt eine realistischere Betrachtung des Bauwerksverhaltens. Hierin erhalten die Ergebnisse von Langzeitmessungen eine wesentliche Bedeutung, da sie zur Kalibrierung der FE-Modelle benötigt werden.

Am Beispiel der Fürwiggetalsperre wurde gezeigt, wie sich aus der stationären Kalibrierung des FE-Strömungsmodells die Durchlässigkeiten der verschiedenen Materialzonen bestimmen lassen. Der Wärmefluss in der Staumauer wurde mit einer instationären Modellrechnung über 10 Beobachtungsjahre simuliert und die Wärmeleitkoeffizienten bestimmt. Auf der Grundlage dieser beiden Modelle konnten Belastungsgrößen für das statische Modell ermittelt werden, wie z.B. die hydraulische Situation bei Hochwasser oder die Temperaturverteilung während eines extrem kalten Winters.

Im Bemessungsfall I „Talsperre voll“ wird die Standsicherheit nachgewiesen, ohne dass Risse in der Staumauer auftreten. Bei extremen Hochwassersituationen des Bemessungsfalls III treten Risse in der Staumauer auf, die Standsicherheit konnte jedoch auch hier nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse belegen die Standsicherheit der Staumauer und sind somit zufriedenstellend. Das Berechnungsverfahren kann jedoch noch verbessert werden. Aus der Fachliteratur sind Verfahren bekannt, die das Materialverhalten des Mauerwerks und Felses noch realistischer abbilden. Dies kann besonders bei der Berechnung der Risse von Bedeutung sein. Gegenüber der hier eingesetzten Methode der „verschmierten“ Risse ist es möglich, den konkreten Rissverlauf zu simulieren. Weiterhin können Effekte erwartet werden, bei denen sich etwaige Risse wieder schließen, so dass das Material hier wieder Druck- und Schubkräfte übertragen kann. Die Modellierung dieser Mechanismen könnte zeigen, dass die jetzigen Berechnungen noch deutliche Reserven aufweisen, auf deren Nutzung man bei einer weiteren „Verschlechterung“ des Belastungsbildes zurückgreifen könnte.

Eine weitere Möglichkeit der realistischeren Abbildung liegt im Übergang der Strömungsberechnung von der jetzigen Betrachtung der Mauer als einem homogenen Körper zur Berücksichtigung der Mauerfugen in einem Modell mit offenen, porösen oder geschlossenen Klüften. Diese Variante scheitert zur Zeit an der benötigten Rechenleistung.

7 Literatur

- [1] Bettzieche, V.; Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer, Wasserwirtschaft 87 (1997); www.ruhrverband.de
- [2] Idel, K.H., Reißler, P.; Standsicherheit einer alten Gewichtsstaumauer; gwf - Wasser/Abwasser 129 (1988), Heft 4
- [3] Reißler, P.; Untersuchungen und Messungen an der Fürwiggemauer; Wasserwirtschaft 81 (1991); www.ruhrverband.de
- [4] SICK100 - Berechnung von stationären und instationären Grundwasserströmungen: Benutzerhandbuch; GWK-Ingenieurgesellschaft, Bochum, 1997; www.gkw-gmbh.de
- [5] DVWK; Berechnungsverfahren für Gewichtsstaumauern - Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 242; 1996

M:\winword\veroffen\grundw4\text.doc

18.02.00 12:00