

Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer

Dr.-Ing. Volker Bettzieche, Abteilung Talsperrenüberwachung und Geotechnik, Ruhrverband, Essen

Kurzfassung / Abstract

Seit 10 Jahren misst der Ruhrverband die Temperaturen in und an der Staumauer der Fürwiggetalsperre. Mit Hilfe eines numerischen Modells wurde das Temperaturverhalten der Staumauer über diesen Zeitraum simuliert und das Modell anhand der Messergebnisse geeicht, so dass Prognosen für zukünftige Szenarien erstellt werden können.

Since 10 years the Ruhr River Association is measuring the temperatures inside and outside the Fürwigge masonry dam. The temperature behaviour of the dam over this period was simulated with a numerical model, based on the finite element method. This model was calibrated with the measurements and used to calculate predictions for future scenarios. The first set of simulations represents one year with average monthly temperatures. During this year only an even temperature distribution appears. An other simulation shows a very cold winter, where the frost penetrates up to three meters into the downstream side of the dam. In conclusion of this analysis can be said, that numerical simulations can give a realistic view of the temperatures inside the dam.

1 Einführung

Die in den Jahren 1902 bis 1904 errichtete Fürwiggetalsperre 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. Für das Mauerwerk der in Talmitte 29 m hohen Gewichtsstaumauer wurden Grauwackensteine aus einem benachbarten Steinbruch mit Kalk-Trassmörtel verwendet.

Wie bei vielen anderen alten 'Intze-Mauern' wurde die Standsicherheit der Fürwiggemauer in den 80er Jahren überprüft und das Stauziel vom Regierungspräsidenten Arnsberg begrenzt. Seit 1987 wird die Talsperre daher mit einer Absenkung von 2,80 m betrieben.

Um genauere Informationen über das Verhalten der Staumauer zu erhalten, erweiterte der Ruhrtalsperrenverein¹ 1986 die zur Überwachung der Mauer vorhandene Messeinrichtung wesentlich. Neben einer Lotanlage, Inkrementalextensometern, Spannungsgebern und Porenwasserdruckgebern wurden in die Mauer Temperaturmesseinrichtungen eingebaut (s. [4,6]). Zwei Bohrungen, die von der Mauerkrone bis in den Fels abgeteuft worden waren, wurden mit je 6 Messfühlern ausgestattet.

Die nun seit fast 10 Jahren vorliegenden Messdaten der Mauer temperatur geben zusammen mit den ebenfalls gemessenen Temperaturen des Wassers in der Talsperre und der Luft Aufschluss über die wechselnden Temperaturverteilungen innerhalb der Staumauer.

Moderne Rechenmethoden erlauben es, Temperaturverteilungen sowie den ihnen zugrundeliegenden Wärmefluss in Bauwerken zu simulieren.

Der Wärmefluss in der Staumauer der Fürwiggeltalsperre wurde rückblickend für die letzten 10 Jahre nachgerechnet und die Berechnung durch die Anpassung entsprechender Parameter anhand der Messung geeicht. Mit Hilfe des so entstandenen Wärmeflussmodells können realistische Simulationen z.B. für Extremzustände durchgeführt werden.

2 Messungen

2.1 Messeinrichtungen und -verfahren

Die Bauwerkstemperaturen in der Fürwiggemauer werden in zwei Bohrungen gemessen, die von der Mauerkrone durch die Mauersohle in den Fels abgeteuft wurden. Die Bohrung 1 wurde im Bereich der Hochwasserentlastung angeordnet und weist eine wasserseitige Neigung von 11:1 auf. Die sechs Temperaturfühler sind mit 5 m Abstand, beginnend 2,55 m unter der Krone, angeordnet. Ihr Abstand zur wasserseitigen Mauer oberfläche beträgt etwa 1,75 m bei den oberen Fühlern und verringert sich auf 0,80 m am Mauerfuß (s. Abbildung 1). Bohrung 2 befindet sich im linken Flügel der Mauer, außerhalb der Hochwasserentlastung und ist ähnlich ausgerüstet.

Die Temperaturen werden wöchentlich abgelesen. Gleichzeitig wird die Lufttemperatur gemessen, die auf diese Weise leider nur einen Tageszufallswert und nicht etwa einen Mittelwert darstellt. Die Wassertemperaturen werden monatlich je nach jahreszeitlichem Temperaturprofil in bis zu 22 verschiedenen Tiefen gemessen.

¹ im Jahre 1990 wurden Ruhrverband und Ruhrtalsperrenverein zum Ruhrverband zusammengefasst

2.2 Messergebnisse

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.

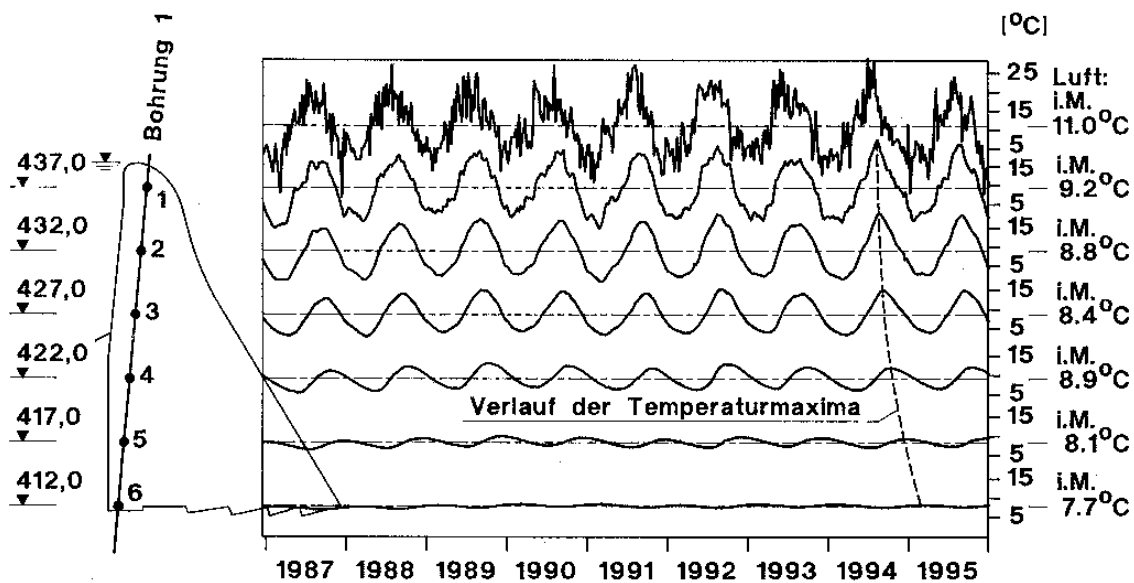


Abbildung 1: Messergebnisse Bohrung 1

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen in der Bohrung 1 sind in Abbildung 1 dargestellt. Oberhalb der Messkurven der 6 Fühler ist die an der Mauerkrone gemessene Lufttemperatur aufgetragen. 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.

3 Numerische Simulation

3.1 Mathematische Grundlagen

Die Berechnung des Wärmeflusses in Bauwerken gehört zu einer Gruppe von mathematischen Problemen, die als Feldprobleme bezeichnet werden und mit Hilfe der Differential-

gleichungen von Laplace gelöst werden können. Neben Wärmeleitungsproblemen können so Sickerströmungen oder Setzungserscheinungen berechnet werden. Die diesen Anwendungen zugrunde liegende Differentialgleichung lautet für eine dreidimensionale Betrachtung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \left(\bar{Q} - \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = 0$$

Die hierin enthaltenen Größen beschreiben in Bezug auf Wärmeleitungsprobleme:

$\varphi(x,y,z,t)$ Temperatur im Punkt (x,y,z) zum Zeitpunkt (t)

$\frac{\partial}{\partial x}$ Gradient in x-Richtung

$\frac{\partial}{\partial t}$ Gradient in Zeitrichtung (zeitliche Änderung der Temperatur)

Q Wärmequellen im Inneren $\frac{W}{m^3}$

λ Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m \cdot K}$

μ Materialkonstante aus dem Produkt von Materialdichte und Wärmekapazität $\frac{Ws}{m^3 \cdot K}$

$$\mu = \rho \cdot c$$

mit

ρ : Materialdichte in $\frac{g}{cm^3}$

c: Wärmekapazität in $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

Die Berechnung konkreter Fragestellungen mit Hilfe dieser Gleichung erfolgt meist nach dem Differenzenverfahren oder der Methode der Finiten Elemente (FEM) [8,9].

Für die Berechnung der Temperaturverteilungen in Staumauern genügt die Betrachtung eines Querschnitts durch die Mauer. Die Temperaturverteilung in Längsrichtung der Mauer wird hierbei als konstant betrachtet. Ein Zu- oder Abfluss von Wärme erfolgt lediglich in der Ebene der „herausgeschnittenen Scheibe“.

Die Methode der Finiten Elemente erfordert für die Berechnung die Abbildung der Realität in ein Modell [1]. Die Geometrie der Staumauer wird in Drei- und Viereckelemente unterteilt (s. Abbildung 2), denen die Materialeigenschaften zugeordnet werden. Die Temperaturwerte werden an den Eckpunkten der Elemente vorgegeben oder berechnet.

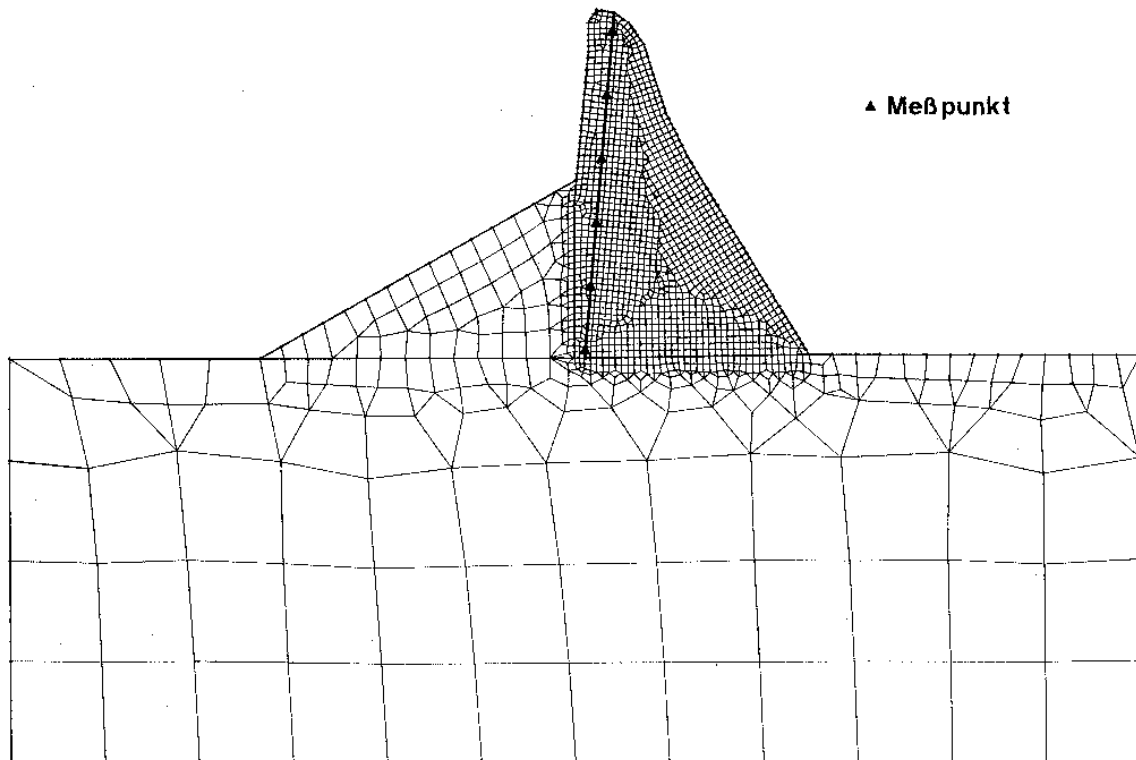


Abbildung 2: Finite-Element-Netz Bohrung 1

Aufgrund der oben beschriebenen Analogie zwischen der Berechnung von Wärmeleitungsproblemen und Sickerströmungen konnte für die hier beschriebene Untersuchung das Grundwasserprogramm SICK 100 [7] eingesetzt werden, das von der GWK-Ingenieurgesellschaft Bochum freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde.

3.2 Berechnungen

3.2.1 Modellerstellung

Zur Berechnung des Temperaturflusses wurden zwei FE-Modelle erstellt. Da ein Temperaturfluss in Längsrichtung der Mauer ausgeschlossen werden kann, genügte für jede Bohrung die Abbildung in ein zweidimensionales Modell, das einen Schnitt durch die Mauer im Bereich der jeweiligen Bohrung darstellt. Zusätzlich zum Mauerkörper wurde der Intzekeil sowie ein ausreichender Ausschnitt des Felsuntergrundes berücksichtigt (s. Abbildung 2).

Das im Weiteren vorgestellte Modell „Bohrung 1“ enthält 1653 Elemente mit 1655 Knoten. Das Modell „Bohrung 2“ mit 1413 Elementen und 1419 Knoten soll hier nicht weiter vorgestellt werden. Die Lage der Messpunkte wurde im FE-Netz durch je einen Netzknoten abgebildet, um einen direkten Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messdaten zu ermöglichen.

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 entnommen werden (s. Tabelle 1). Für den Fels, unter der Staumauer der Fürwiggetalsperre stehen Ton- und Sandsteine an, wurden die Materialwerte der Wärmeleitfähigkeit und -kapazität des Sandsteins angenommen. Die entsprechenden Werte des Bruchsteinmauerwerks liegen zwischen denen des Festgesteins und den Werten für Zement. Sie sind in Anlehnung an [3] angenommen. Die Kennwerte für den Lehm des Intzekeils wurden unter Berücksichtigung eines Porenanteils von $n = 0,2$ aus den Kennwerten von Ton und Wasser ermittelt.

Material	Dichte	Wärmeleitfähigkeit		Wärmekapazität	
		Startwert	geeicht	Startwert	geeicht
Einheit	g / cm ³	W / (m * K)	W / (m * K)	kJ / (kg * K)	kJ / (kg * K)
Granit	2,70	3,49		0,83	
Basalt	3,00	1,67		0,86	
Beton	2,00	1,00		0,88	
Sandstein	2,20	2,30		0,71	
Zement	2,10	1,00		1,13	
Ton, trocken	1,80	1,00		0,88	
Wasser	1,00	0,60		4,18	
Bruchstein- mauerwerk	2,30	2,55	3,32	1,01	0,71
Fels	2,40	2,30	3,00	0,71	0,43
Lehm des Intzekeils	2,10	1,00	1,20	1,72	1,38

Tabelle 1: Materialkennwerte

Bei der Eichung des Modells (s. 3.2.2) wurden diese Materialkonstanten als Startwerte benutzt und solange verändert, bis ein akzeptables Ergebnis vorlag. Hierdurch konnten die

zunächst angenommenen Werte verifiziert werden. Die Materialparameter der Modelle „Bohrung 1“ und „Bohrung 2“ wurden bei der Eichung aufeinander abgestimmt.

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.

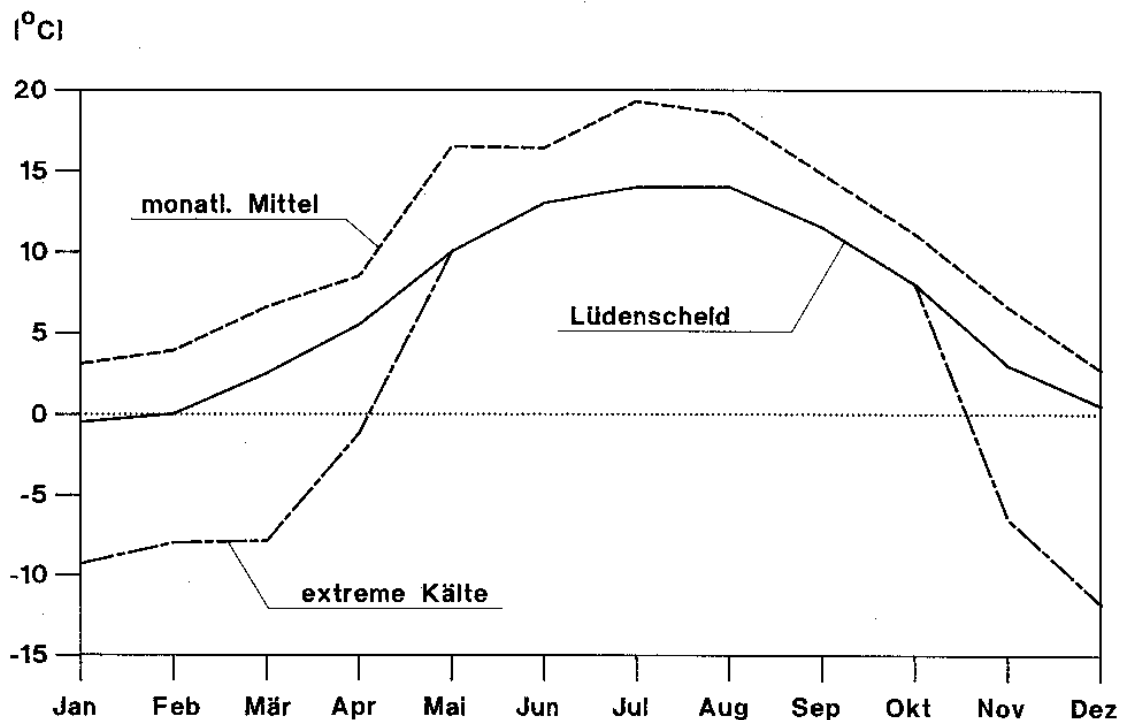


Abbildung 3: Lufttemperaturen

Zur Eingabe der Temperaturrandbedingungen an der Luftseite standen nur Werte zur Verfügung, die am Tag der Messung der Temperaturfühler vom Messtrupp zu einem zufälligen Zeitpunkt abgelesen wurden. Die so festgehaltenen Werte stellen somit einen zufälligen Wert zwischen der maximalen und minimalen Temperatur am Messtag dar. Um mit diesen Werten dennoch rechnen zu können, wurden sie mit den langfristigen Wetterdaten an der nahegelegenen Wetterstation Lüdenscheid [5] verglichen. In der Gegenüberstellung der gemittelten Messwerte der Fürwiggetalsperre und der Station Lüdenscheid (s. Abbildung 3) zeigte sich, dass die Kurven der mittleren Monatstemperatur mit einem Abstand von etwa 4° C nahezu parallel verlaufen. Da die hier betrachteten Temperaturwirkungen auf Staumauern langfristigen Einflüssen unterliegen und somit einzelne Tageswerte und die in ihnen evtl. enthaltenen Messfehler von untergeordneter Bedeutung sind, konnte anhand der A-

nologie der beiden Messkurven bei der Simulation davon ausgegangen werden, dass die Tagesmittelwerte mit 4 °C Differenz zu den Messergebnissen der Lufttemperatur angenommen werden durften.

Zur Simulation eines seltenen Temperaturereignisses, wie es die DIN 19700 Teil 11 zum Nachweis der Standsicherheit von Gewichtsstaumauern für den Lastfall 3 vorsieht, sollte eine durchschnittliche Wiederholzeitspanne von 200 Jahren berücksichtigt werden. Anhand der Ergebnisse der manuellen Temperaturmessung wurde eine statistische Analyse erstellt, die für jeden Monat eine Standardabweichung (im Mittel 2,8 °C) ergab. Mit der erforderlichen Wahrscheinlichkeit von 99,5% ließen sich (bei der Annahme einer normalverteilten Grundgesamtheit) die Extremtemperaturen φ aus dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ wie folgt errechnen:

$$\varphi = \mu \pm 2,576 \sigma$$

Für die Simulation des extrem kalten Winters wurden die entsprechenden Lufttemperaturen von November bis April angesetzt, was aufgrund der langen Dauer eine „auf der sicheren Seite liegende“ Annahme ist. Auch diese Werte wurden für die Berechnung analog zu den tatsächlichen Messwerten um 4 °C reduziert.

3.2.2 Nachrechnung der Jahre 1986 bis 1995 (Eichung)

Die Nachrechnung der Temperaturverhältnisse in der Mauer erfolgte 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.

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 1, Spalte 3 und 5) variiert, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht war. Die Materialkonstanten wurden hierbei nur global für die drei Materialien geändert. Eine elementweise Abstimmung wurde nicht durchgeführt, da das Modell eine globale Aussage treffen sollte. Aus dem selben Grund wurden die Parameter für beide Teilmodelle („Bohrung 1“ und „Bohrung 2“) auch immer gleich gehalten.

Als Ergebnis der Eichung wurden die in Tabelle 1 in der 4. und 6. Spalte angegebenen Materialkonstanten ermittelt.

Die an den Messpunkten errechneten Temperaturganglinien zeigen eine deutliche Übereinstimmung mit den Messwerten. Exemplarisch sind in Abbildung 4 an drei Messpunkten die Ganglinien der Rechnung und der Messung einander gegenüber gestellt.

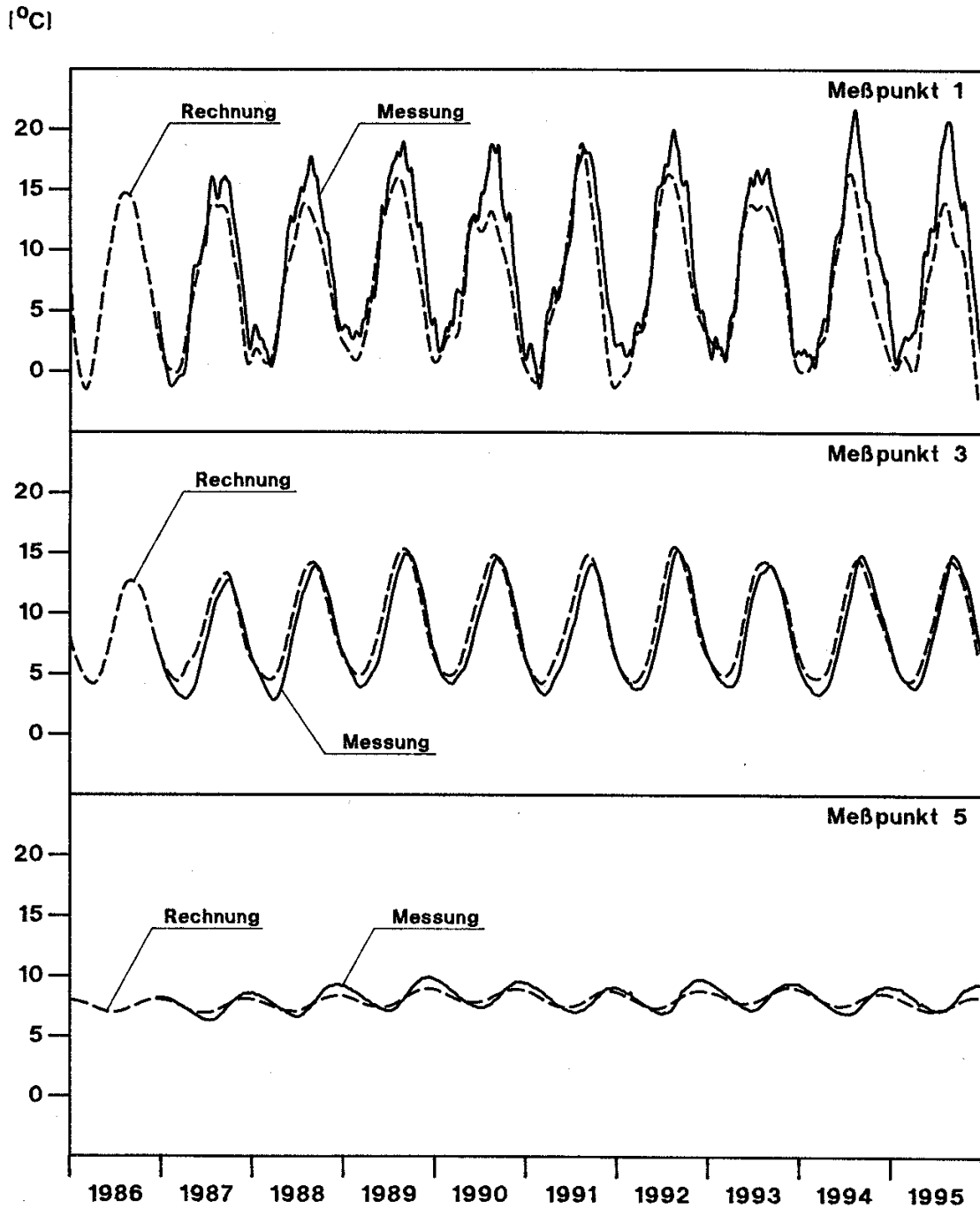


Abbildung 4: Ganglinien an drei Messpunkten

Der nur etwa 2,50 m unter der Mauerkrone liegende Messpunkt 1 zeigt sich noch wesentlich durch die Schwankungen der Lufttemperatur beeinflusst. Um so mehr, als der Stauspiegel meist 1,70 m unter der Höhe des Messpunktes lag, so dass die Wassertemperatur kaum auf den oberen Mauerkörper wirken konnte.

Die errechnete Temperaturkurve passt sich jedoch recht gut in die gemessenen Werte ein, insbesondere bei Berücksichtigung der oben erwähnten Ungenauigkeiten bei der Vorgabe der Temperaturrandbedingungen, die sich hier aufgrund der dreiseitigen Nähe zur Maueroberfläche besonders bemerkbar machen.

Am zweiten (nicht dargestellt) und dritten Messpunkt liegen die Kurven der Rechen- und Messergebnisse praktisch übereinander. Das Temperaturverhalten wird durch die Rechnung erfasst.

Die drei unteren Messpunkte zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Exemplarisch sind die Ganglinien am fünften Messpunkt dargestellt. Der Temperaturfluss wird hier nicht nur durch das Mauerwerk, sondern auch durch den Intzekeil beeinflusst, der sich stark dämpfend auswirkt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das Modell den Wärmefluss gut nachbildet. Die Ganglinien an den Messpunkten 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.

3.2.3 Simulationen

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

Für die Fürwiggetalsperre wurden zwei Szenarien simuliert:

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

3.2.3.1 Mittlerer Jahrgang der Temperatur

Die Simulation des mittleren Jahrgangs erfolgte, wie in Abs. 3.2.1 beschrieben, mit den monatlichen Mittelwerten der Temperatur. Die Temperaturverteilungen in der Staumauer während eines mittleren Jahrgangs sind in Abbildung 5 dargestellt.

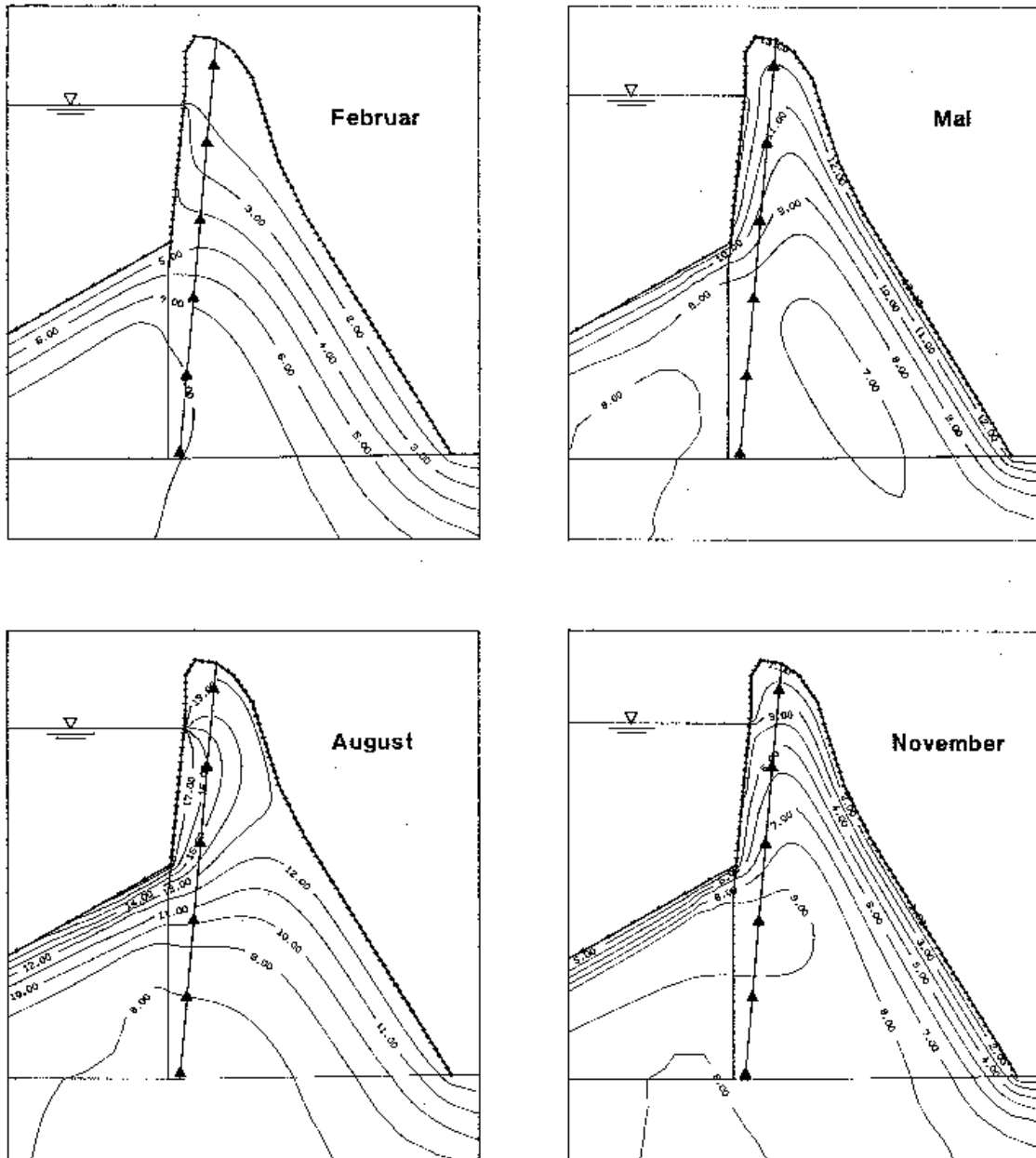


Abbildung 5: Temperaturverteilungen in der Staumauer bei einem mittleren Jahrgang der Temperatur

Im Februar ist der Mauerkörper 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 deutlich an. Hierdurch erwärmen sich die äußeren Mauerbereiche deutlich. In Mauermitte entsteht eine „Kälteinsel“ mit 7 °C Temperatur. 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 Wasserschichten 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.

3.2.3.2 Extremer Winter

Bei der Berechnung des seltenen Temperaturereignisses wurden die extremen Wintertemperaturen ab November an die mittleren Temperaturen „angehängt“. Die Lufttemperaturen für den Beginn (November) und das Ende (April) der angenommenen Frostperiode wurden zur Vermeidung eines zu krassen Übergangs eingepasst. In Abbildung 6 sind die Temperaturfelder im Februar und Mai dargestellt.

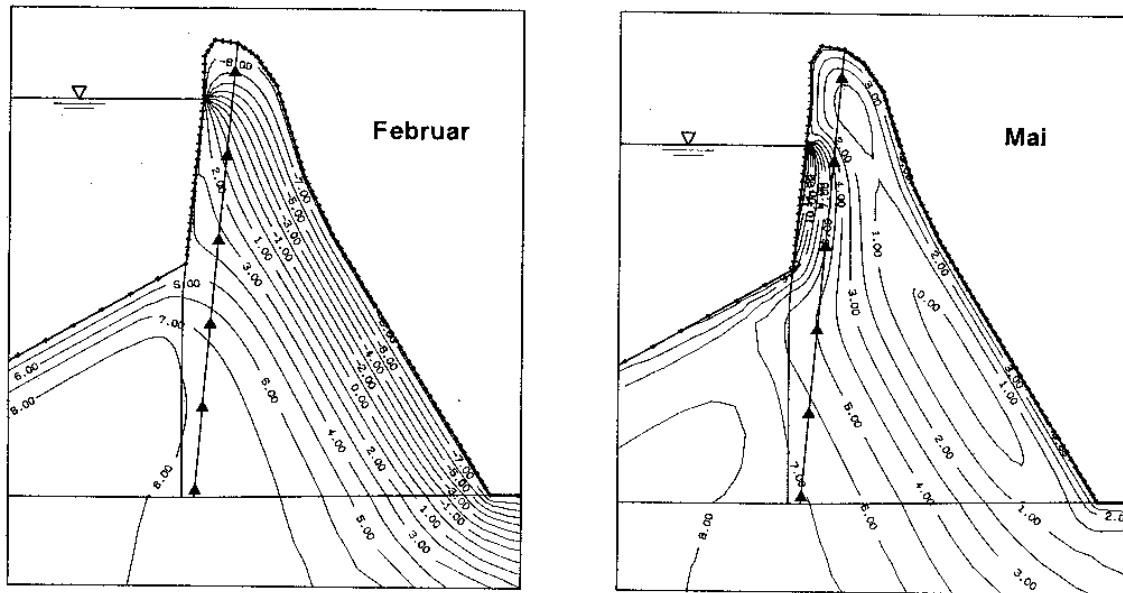


Abbildung 6: Temperaturverteilungen in der Staumauer in und nach einem extrem kalten Winter

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 durchgefren. 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.

4 Ergebnisse

Der Vergleich der Rechenergebnisse des zweidimensionalen Modells mit den Ergebnissen der Messung zeigt, dass die Temperaturverhältnisse in der Staumauer vom Berechnungsmodell abgebildet werden können. Die über einen Zeitraum von 10 Jahren durchgeführte Simulationsrechnung zeigt keine Tendenz zur Veränderung dieser Übereinstimmung. Hier-

aus lässt sich schließen, dass die zugrundeliegenden Materialeigenschaften ebenfalls zeitlich unverändert bleiben.

Im DVWK-Merkblatt 222 [2] wird die Überwachung der Temperatur in einer Staumauer für die ersten 3 bis 5 Jahre nach ihrer Errichtung empfohlen. Die Berechnungsergebnisse bestätigen diese Forderung, die besagt, dass die Messungen eingestellt werden können, wenn das Temperaturverhalten der Staumauer geklärt ist und die Materialkonstanten z.B. mit Hilfe der hier vorgestellten Vorgehensweise bestimmt worden sind. Die Temperaturverteilungen in der Mauer können dann mit entsprechenden Simulationsrechnungen für beliebige Szenarien bestimmt werden.

5 Schrifttum

- [1] Bettzieche, V.; Systematische Erstellung von Modellen bei der Simulation von Grundwasserströmungen nach der Methode der Finiten Elemente: Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Institutes für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Mitteilung Nr. 91-11; 1991
- [2] DVWK; Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 222; 1991
- [3] Enderlein J. et al.; Ergebnisse von Deformationsmessungen an Gewichtsstaumauern aus Bruchsteinen; Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft; Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1961
- [4] Idel, K.H., Reißler, P.; Standsicherheit einer alten Gewichtsstaumauer; gwf - Wasser/Abwasser 129 (1988), Heft 4
- [5] MURL; Klima-Atlas von Nordrhein-Westfalen; Düsseldorf, 1989
- [6] Reißler, P.; Untersuchungen und Messungen an der Fürwiggemauer; Wasserwirtschaft 81 (1991)
- [7] SICK100 - Berechnung von stationären und instationären Grundwasserströmungen: Benutzerhandbuch Version 21.1; Bochum, 1996
- [8] Törnig, W. et. al.; Numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen der Technik; Stuttgart: Teubner Verlag, 1985
- [9] Zienkiewicz, O.C.; Methode der Finiten Elemente; München: Hanser Verlag, 1984