

Temperaturmessung in einer Staumauer mittels Glasfaserkabel

Volker Bettzieche¹, Heinz Döring²

1 Problemstellung

Talsperren sind ein wichtiges Element der Versorgungswirtschaft. Durch die langfristige Speicherung des Wassers erfüllen sie verschiedenste Aufgaben, die von der Versorgung der Bevölkerung und Industrie mit Rohwasser über den Hochwasserschutz bis zur Energiegewinnung reichen. Im Bewusstsein der Allgemeinheit sind Talsperren häufig wegen der Möglichkeiten der Freizeitnutzung verankert, nicht zuletzt, weil die Belastungen, denen eine Staumauer oder ein Staudamm über Jahrzehnte standhalten muss, für das Publikum kaum zu erkennen sind. Für den Ausenstehenden unsichtbar überwachen Messgeräte jede Veränderung des Absperrbauwerks und melden etwaige Unregelmäßigkeiten sofort an die betreffenden Stellen weiter.

Staumauern werden besonders von zwei Größen beansprucht. Ohne Weiteres erkennbar belastet der Wasserdruck die Staumauer entsprechend dem Füllstand der Talsperre. Je höher das Wasser im Stauraum steigt, desto größer wird die auf die Staumauer wirkende Wasserlast. Gegenüber der leeren Talsperre verschiebt sich die Krone der Staumauer einer vollen Talsperre um mehrere Zentimeter.

Verformungen in gleicher Größenordnung werden aber auch durch die zweite Beanspruchung erreicht, die unsichtbar innerhalb der Staumauer wirkt. Hervorgerufen durch die jahreszeitlich wechselnden Wasser- und Lufttemperaturen treten auch innerhalb einer Staumauer wechselnde Temperaturen auf, die ihrerseits zu Beanspruchungen in der Staumauer und zu Bewegungen der Mauer führen.

Die Kenntnis dieser Temperaturbeanspruchungen ist also bei der Betrachtung der Sicherheit einer Staumauer von nahezu gleicher Bedeutung wie die Kenntnis über die Wirkung der Wasserlast. Der Nachweis der Sicherheit wird mit Hilfe eines rechnerischen Standsicherheitsnachweises geführt, in dem beide Belastungen, neben weiteren Lasten, berücksichtigt werden [3], [5].

Während die Größe des Wasserdrucks aus dem Füllstand der Talsperre leicht abgeleitet werden kann, ist über die Belastung infolge der Temperaturbeanspruchung meist wenig bekannt.

Aus diesem Grund empfiehlt z.B. das Merkblatt 222 des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK [4] den Einbau von Temperaturfühlern in mindestens 3 Messlinien mit je 5 Messpunkten im Mauerkörper. Hiermit soll die Temperaturverteilung in der Staumauer innerhalb der ersten 3 bis 5 Jahre nach der Errichtung einer Staumauer mittels monatlicher Messungen beobachtet werden.

Bei den z.Zt. üblichen Einrichtungen handelt es sich um elektrische Temperatur-Messfühler, die mit Hilfe eines temperaturabhängigen Widerstands arbeiten. Sie

¹ Dr.-Ing. Volker Bettzieche, Leiter der Abteilung Talsperrenüberwachung und Geotechnik, Ruhrverband, Kronprinzenstraße 37, 45128 Essen; E-Mail: vbe@ruhrverband.de

² Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Döring, Gruppe OPTRONIK, Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida; E-Mail: doering@htwm.de

werden in Bohrungen im Mauerkörper eingebaut und ermöglichen eine punktuelle Messung der Mauerwerktemperatur. Für den Bereich zwischen den Messfühlern müssen Annahmen getroffen werden [2].

Wie bisher durchgeführte Untersuchungen zeigen [1], ist jedoch eine genauere Kenntnis über die Temperaturverteilung in der Mauer von großer Bedeutung für die Überwachung der Staumauer und zur Beurteilung ihrer Standsicherheit.

2 Glasfaser-Temperatur-Messtechnik

Eine neue Möglichkeit in dieser Richtung eröffnet die faseroptische Temperatur-Messtechnik [6], die es gegenüber den bisherigen punktuellen Messungen ermöglicht, die Temperaturen im Bauwerk und an seiner Oberfläche entlang eines Glasfaser-Messkabels, also linienförmig, zu erfassen. Als Messeinrichtung dient ein gewöhnliches Glasfaserkabel, wie es im Bereich der Telekommunikation oder der Datenverarbeitung eingesetzt wird. Entsprechend den Umgebungsbedingungen wird es noch mit zusätzlichen Schutzhüllen und Zugentlastungselementen versehen.

Das Messverfahren beruht auf dem aus der optischen Nachrichtentechnik bekannten Rückstreuverfahren OTDR (optical time domain reflectometry).

Ein Taktgenerator steuert über eine Streueinheit einen Laser so an, dass er einen sehr schmalen Lichtimpuls hoher optischer Leistung erzeugt (s. Abbildung 1). Dieser Lichtimpuls wird in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt. Der Impuls wird bei seiner Ausbreitung entlang des Glasfaserkabels kontinuierlich gedämpft. Die Dämpfungsursachen im Lichtwellenleiter liegen zu einem geringen Teil in der Absorption, zum überwiegenden Anteil jedoch in der Streuung.

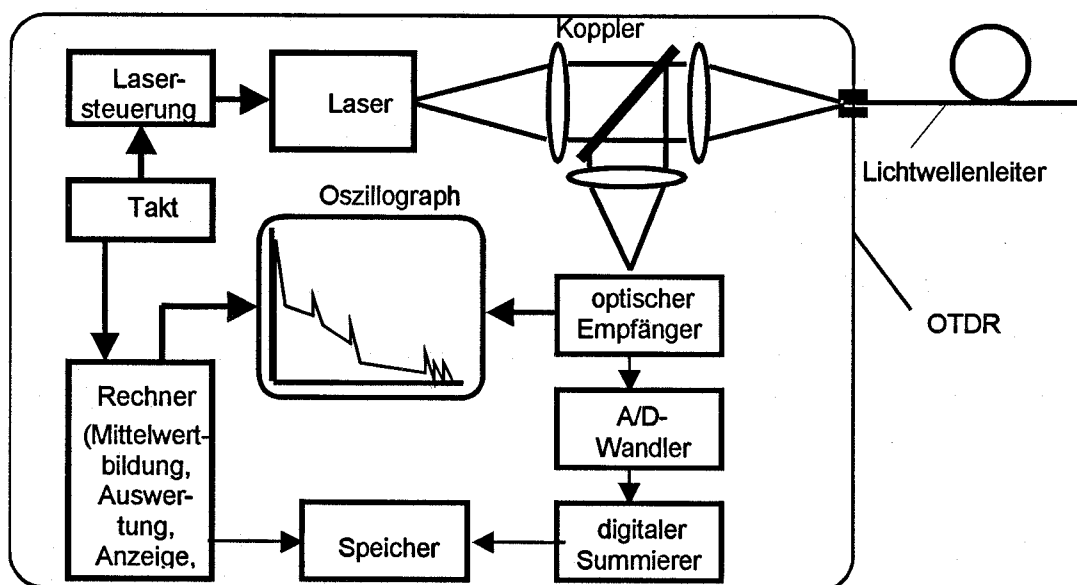


Abbildung 1: Rückstreuverfahren

Von diesem gestreuten Licht wird ein kleiner Teil rückwärts abgestrahlt, so dass er als kontinuierlicher Messwert zum Sendergerät als sogenanntes Rückstreulicht zurück läuft und dort empfangen werden kann.

Die Intensität des rückgestreuten Lichtes ist um mehrere Größenordnungen geringer als die Intensität des ursprünglichen Impulses. Das von der Photodiode im Empfänger gewonnene Signal ist deshalb extrem stark verrauscht. Erst eine Signalverarbeitung mit digitaler Mittelwertbildung liefert deshalb brauchbare Messwerte.

Die Auswertung des Rückstreusignals erfolgt grundsätzlich, wenn der Laser kein Licht liefert, also in der Pause zwischen den Lichtimpulsen. Das ist ein Grund, warum man mit möglichst kurzen Impulsen und langen Pausen des Lasers arbeitet. Ein Rückstreusignal wird solange ausgewertet, bis der eingekoppelte Lichtimpuls den Lichtwellenleiter bis zum Ende durchlaufen hat und das von dort rückgestreute Signal wieder den Empfänger erreicht hat. Anschließend wird ein neuer Lichtimpuls durch den Laser erzeugt und eine weitere Rückstreukurve entsteht.

Die Taktfrequenz des Lasers legt damit die maximal mögliche Laufzeit des Impulses und damit die maximale Länge des Lichtwellenleiters fest:

$$\text{Länge } l = \frac{ct}{2n}$$

mit: t: Laufzeit des Lichtimpulses
1/2, um Hin- und Rückweg zu berücksichtigen
c: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
n: Brechzahl des Lichtwellenleiters

Mit diesem Zusammenhang lässt sich jede beliebige andere Entfernung (z.B. zu einem bestimmten Punkt im Lichtwellenleiter, bei der sich das Rückstreusignal signifikant ändert) bestimmen, wenn die zugehörige Laufzeit bekannt ist.

Das im Empfänger ankommende Signal wird mit einer hohen Frequenz f_A (Periodendauer t_A) abgetastet. Je kürzer diese Periodendauer ist, um so höher ist die Auflösung des Systems.

$$\text{Auflösung: } R_1 = \frac{ct_A}{2n} = \frac{c}{2nf_A}$$

mit R1: Auflösung
 t_A : Abtastintervall
 f_A : Abtastfrequenz

Zu berücksichtigen ist aber weiterhin, dass die Auflösung nie besser sein kann als die entsprechende Breite des Laserimpulses. Dies ist der Hauptgrund, weshalb man möglichst kurze Impulse nutzt. Andererseits führt eine Impulsverkürzung zu einer geringen Energie im Impuls und verringert das ohnehin schon sehr geringe Rückstreusignal. Je nach Messaufgabe ist deshalb ein geeigneter Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung und Signalqualität zu wählen.

Die Messwerte sind im Verlauf und der Amplitude des rückgestreuten Signals enthalten. Bei einem völlig homogenen Lichtwellenleiter mit konstanten äußeren Bedin-

gungen auf seiner gesamten Länge wird der eingekoppelte Lichtimpuls mit zunehmender Zeit bzw. entsprechender Entfernung nach einem fundamentalen physikalischen Gesetz exponential gedämpft. Das gleiche geschieht mit dem rückwärts laufenden rückgestreuten Licht. Die Rückstreckurve hat deshalb immer tendenziell einen exponentiell fallenden Verlauf, der allerdings durch die im Messgerät vorgenommenen Logarithmierung als abfallende Gerade dargestellt wird.

Treten entlang des Lichtwellenleiters Inhomogenitäten oder veränderte äußere Bedingungen auf, die eine zusätzliche Dämpfung hervorrufen, so sind diese Änderungen als Diskontinuitäten im Rückstreubild sichtbar.

Wie äußere Bedingungen die Streuung beeinflussen, hängt vor allem von der Art der Streuung ab. In Lichtwellenleitern sind drei Streuungsarten von Bedeutung:

- Rayleigh-Streuung (relativ hohe Intensität, keine Wellenlängenverschiebung)
- Brillouin-Streuung (geringe Intensität, geringe symmetrische Wellenlängenverschiebungen führen zu sog. Stokes und Anti-Stokes)
- Raman-Streuung (geringe Intensität, aber größere Wellenlängenverschiebungen als Brillouin-Streuung)

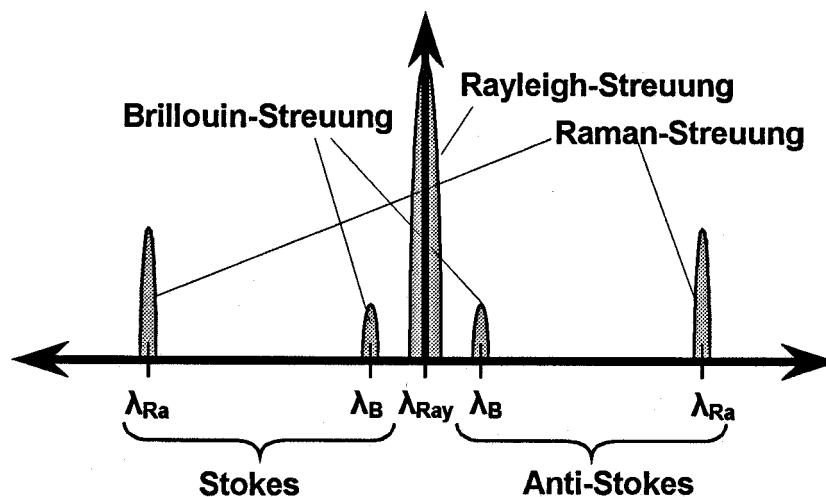


Abbildung 2: Streuung in Lichtwellenleitern

Während in der optischen Nachrichtentechnik die Rayleigh-Streuung zur Untersuchung von verlegten Lichtwellenleitern mit OTDR-Geräten benutzt wird, wird in der verteilten Sensorik die Brillouin- und Raman-Streuung ausgenutzt.

Die Brillouin-Streuung wird bei der verteilten Strain-Messung ausgenutzt (Optical fiber strain measurement system AQ-8601 der Firma Ando).

Die überwiegende Anzahl von Publikationen beschäftigt sich jedoch mit der verteilten faseroptischen Temperaturmessung auf der Grundlage der Raman-Streuung [8], [10]. Sie ist derzeit die einzige kommerziell verfügbare verteilte Technik [7], [11].

Die entsprechenden Stokes werden mit schmalen optischen Filtern aus dem Spektrum des gesamten Rückstreusignals herausgefiltert.

Die Raman Stokes sind um etwa $\pm 440 \text{ cm}^{-1}$ gegenüber der ursprünglichen Wellenlänge verschoben; in Glas-Lichtwellenleitern entspricht das einer Wellenlängenverschiebung von ca. $\pm 100 \text{ nm}$ bei einer spektralen Breite von etwa 50 MHz.

Entscheidend für das Temperaturmessverfahren ist, dass die Intensität des Stokes weitgehend temperaturunabhängig, die Intensität der Anti-Stokes dagegen stark temperaturabhängig ist. Bildet man das Verhältnis beider Intensitäten, erhält man eine absolute Größe für die Temperatur bei gleichzeitiger Unterdrückung von Störeinflüssen (z.B. Dämpfungsstellen im Lichtwellenleiter):

$$\frac{I_A}{I_S} = \left(\frac{n_O + n_k}{n_O + n_k} \right)^4 e^{-\frac{hcn_k}{kT}}$$

- mit:
- I_A : Intensität des Anti-Stokes
 - I_S : Intensität des Stokes
 - ν_O : Wellenzahl des eingekoppelten Lichtes
 - ν_K : Verschiebungsbetrag der Wellenzahl
 - T: absolute Temperatur in °K
 - k: Boltzmann-Konstante
 - h: Planck'sches Wirkungsquantum
 - c: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Aus obiger Gleichung geht hervor, dass das Ergebnis neben der Wellenzahlverschiebung nur von der absoluten Temperatur abhängig ist. Damit ist das faseroptische verteilte Temperaturmessverfahren ein hochgenaues Verfahren mit einer überdurchschnittlichen Streckenneutralität. Die Empfindlichkeit des Verfahrens beträgt ca. $0,8 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ bei Verwendung von Glas-Lichtwellenleitern.

In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Wellenzahlverschiebung, die ausschließlich von dem Material des Lichtwellenleiters abhängt, toleranzbehaftet ist. Als Sensor werden sogenannte Gradienten-Lichtwellenleiter eingesetzt. Der Name stammt von dem allmählichen Übergang der Brechzahl des Lichtwellenleiters von Kernmittelpunkt zum Rand. Um diesen Brechzahlverlauf zu erzielen, muss während der Herstellung des Lichtwellenleiters das Grundmaterial (Quartals: SiO_2) dotiert werden und diese Dotierung kontinuierlich geändert werden. Dadurch werden die Materialeigenschaften technologieabhängig und die Wellenzahlverschiebung in geringem Maße toleranzbehaftet. Die dadurch entstehenden Messfehler werden durch eine Kalibrierung der Messung ausgeglichen. Dazu wird während der Messung ein Abschnitt des Lichtwellenleiters mit definierter Temperatur geheizt, z.B. mit Hilfe eines Wasserbades.

Als typische Parameter der faseroptischen verteilten Temperatursensorik kann man heute ansehen:

- absolute Genauigkeit: $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ bei -50°C ... 80°C
- Sensorlänge: 20 km
- Arbeitsbereich: -140°C ... 450°C bei pH-Werten >2 und Druck bis zu 75 Mpa

Die im praktischen Betrieb erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit hängt entscheidend davon ab, in welchem Maße es gelingt, das Signal-Rausch-Verhältnis durch Mittelwertbildung zu verbessern. Das kann durch folgenden praktischen Fall illustriert werden; bei einer typischen Laser-Impulsleistung von 100 mW dauert eine Messung (die bereits eine Mittelwertbildung beinhaltet) z.B. 60 s. Eine 256-fache Wiederholung reduziert den Messfehler um den Faktor $\sqrt{256} = 16$.

3 Realisierung an der Ennepestaumauer

Zur praktischen Untersuchung dieser Möglichkeiten wurde ein entsprechendes Glasfaserkabel neben einer konventionellen Messtechnik in die fast 100 Jahre alte Staumauer der Ennepetalsperre des Ruhrverbands eingebaut.

Die Ennepetalsperre, deren Absperrbauwerk eine 320 m lange und 51 m hohe Gewichtsstaumauer aus Bruchsteinen ist, wurde zwischen 1902 und 1904 erbaut, um den Abfluss der Ennepe zu vergleichmäßigen und dadurch den unterhalb angesiedelten Fabriken auch im Sommerhalbjahr zuverlässig Wasserkraft bereitzustellen. Nach einer zusätzlichen Erhöhung der Staumauer zwischen 1910 und 1912 stehen seither 12,6 Mio. m³ Stauraum zur Verfügung. Die Ennepestaumauer war seinerzeit, entsprechend den von Prof. Intze bei früheren Staumauern generell verwirklichten Entwurfsvorstellungen, ohne Berücksichtigung des Poren- bzw. Sohlenwasserdrucks im Inneren der Staumauer bemessen worden. Anfang der achtziger Jahre wurden, auch in Folge von Alterungserscheinungen, Defizite der Standsicherheit der Staumauer vermutet. Da der damalige Eigentümer nicht in der wirtschaftlichen Lage war, diese zu beheben, übernahm der Ruhrverband 1997 die Talsperre und begann sofort mit der Sanierung [9].

Das Sanierungskonzept beruhte auf der Auffahrung eines Kontroll- und Drainagestollens unter der Staumauer. Von diesem Stollen aus konnten Drainagebohrungen zur Entwässerung des Mauerkörpers durchgeführt werden (s. Abbildung 3).

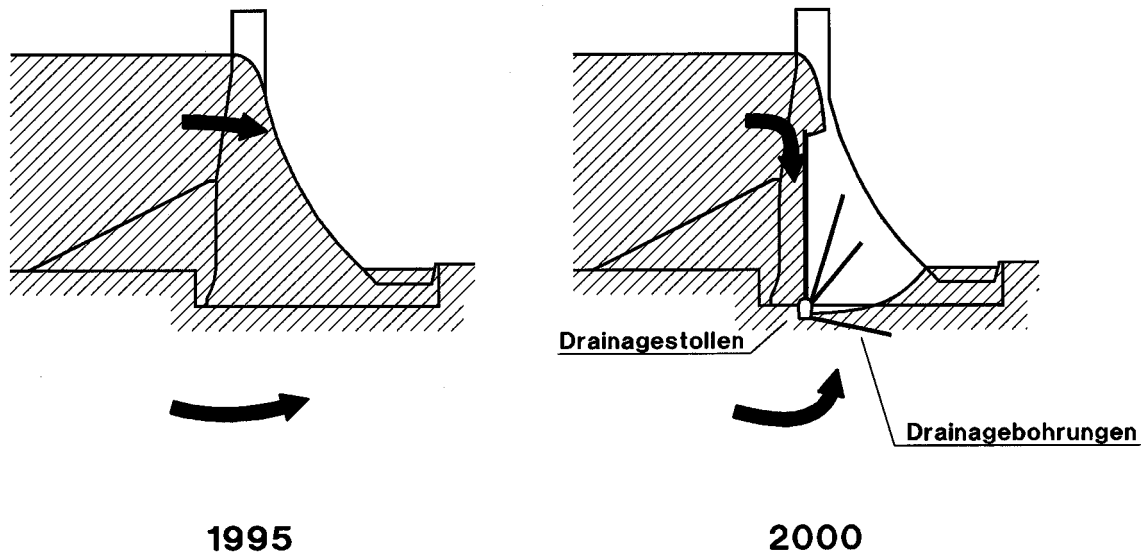


Abbildung 3: Konzept der Sanierung der Ennepestaumauer

Zur Beurteilung der Belastung der Staumauer durch Temperaturspannungen wurden zwei Messquerschnitte mit je vier Bohrungen vom Kontroll- und Drainagegestollen aus eingerichtet und mit insgesamt 32 Temperaturfühler der Bauart PT100 ausgerüstet. Weitere zwei Temperaturfühler im Stauraum und auf der Luftseite sowie drei Fühler in der Mauerkrone runden das Messprogramm ab (s. Abbildung 4).

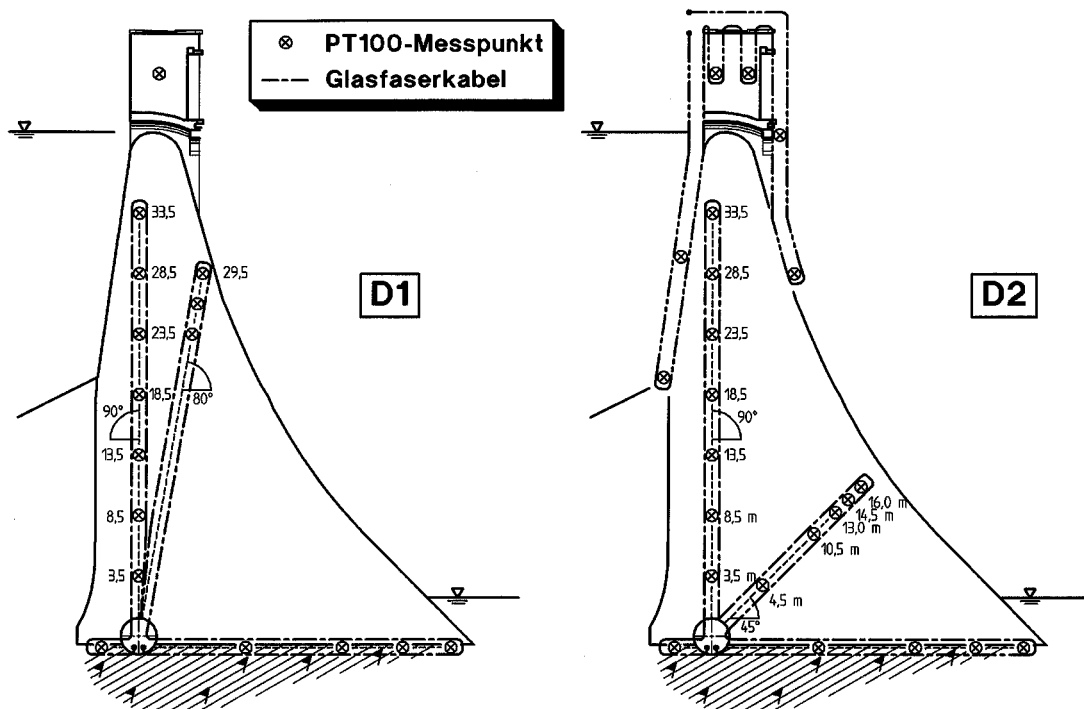


Abbildung 4: Temperatur-Messeinrichtungen in den Profilen D1 und D2

Die Messfühler sind mit drei Datenloggern verbunden, die wiederum mit Hilfe eines fest installierten PCs angesteuert werden. Die Messfrequenz kann beliebig einge-

stellt werden. Es hat sich gezeigt, dass eine $\frac{1}{2}$ -stündliche Messung mehr als ausreichende Daten liefert.

Diese Ausstattung mit insgesamt 35 Messfühlern im Mauerkörper überschreitet die im DVWK-Merkblatt empfohlene Anzahl von 15 Fühlern deutlich. Dennoch kann so die Temperatur nur an eben diesen 35 Punkten gemessen werden, nicht jedoch in den Bereichen dazwischen.

Zum Vergleich und zur Erprobung der Messtechnik wurde daher ein durchgängiges Glasfaserkabel durch alle Bohrungen gezogen. Das Kabel wurde durch eine entsprechende Verbindungsbohrung bis auf die Krone der Staumauer weitergeführt und von dort in den Stauraum sowie über die Luftseite der Staumauer. Die gesamte Einbaulänge beträgt rund 800 m Glasfaserkabel, wovon 217 m als effektive Messstrecke verwendet werden, die restlichen Längen werden als Zuleitungen benötigt. Das Glasfaserkabel wurde in zwei Ausführungen eingesetzt:

Im Mauerkörper wurde ein Kabel des Typs A-D(ZN)2Y 4 G 50/125 1 F 600 N (Bezeichnung nach DIN VDE 0888) verwendet. Es besitzt eine zentrale Bündelader mit vier optischen Fasern und Gelfüllung. Ein Quellband dient als Längswasserschutz, zusätzlich besitzt es eine nichtmetallische Zugentlastung und einen verstärkten Schichtenmantel. Im Außenbereich auf der Wasser- und Luftseite der Staumauer wurde ein Kabel des Typs A-D(ZN) 2Y B2Y 4 G 50/125 3 B 400 F 600 verwendet, das zusätzlich einen PE-Außenmantel besitzt.

4 Erfahrungen

4.1 Einbau

Der Einbau des Glasfaserkabels erfolgte zusammen mit den PT100-Temperaturfühlern. Das Glasfaserkabel wurde als Schlaufe durch das Bohrloch geführt, deren oberes Ende mit Hilfe einer Umlenkrolle einen definierten Radius erhielt, um Kabelbrüche zu vermeiden (s. Abbildung 5). Umlenkrolle und Kabel wurden mit Hilfe eines Einbaugestänges in die Bohrung geschoben. Das Gestänge diente zusätzlich als Träger für bis zu sieben Temperaturfühler, die in derselben Bohrung untergebracht wurden. Der verbleibende Hohlraum der Bohrung wurde anschließend verfüllt, um eine hydraulische Verbindung und den dadurch möglichen Wärmetransport zwischen den Fühlern auszuschließen.

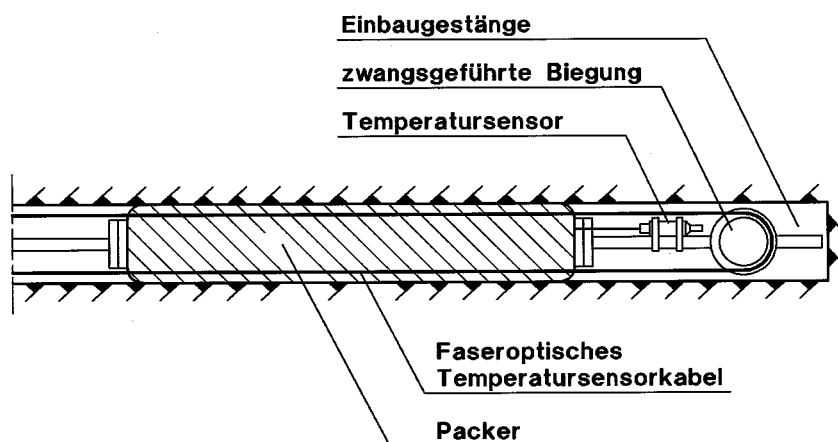


Abbildung 5: Einbausituation der Temperaturfühler und des Glasfaserkabels

Aufgrund der guten Vorbereitung der Arbeiten durch die ausführende Firma, insbesondere in Form einer Vormontage der Messfühler am Einbaugestänge und einer Kennzeichnung der Gestängeteile, ließen sich alle Fühler an einem Tag in die Bohrungen einführen. Etwas unhandlich gestaltete sich dabei das Verlegen des Glasfaserkabels, das zur Vermeidung von dämpfenden Stossstellen in einem Stück eingelegt werden musste. Hier half der zuvor aufgestellte Einbauplan, das mehrere hundert Meter lange Kabel nicht zu "verknoten".

Das Verfüllen und Verpressen der Bohrungen konnte schon am nächsten Tag durchgeführt werden. Zur Wahrung der Gewährleistungsansprüche war der Hersteller der konventionellen Messeinrichtungen auch für diese Arbeiten verantwortlich.

4.2 Messbetrieb

Nach dem gleichzeitigen Einbau beider Messsysteme in die Staumauer wurden die Temperaturmessungen mit Hilfe des Glasfaserkabels Ende Dezember 1998 aufgenommen. Das konventionelle Messsystem war aus verschiedenen Gründen erst Anfang Mai 1999 betriebsbereit.

Die Glasfaser-Temperatur-Messungen werden seither monatlich durchgeführt. Dieser Rhythmus entspricht den Forderungen des DVWK-Merkblatts. Die Messungen werden vom Hersteller des Messsystems durchgeführt, der auch die Lasereinheit zu jeder Messung mitbringt. Automatische Laser-Messeinrichtungen stehen noch nicht zur Verfügung und so wird zur Durchführung und Auswertung jeder Messung das Messgerät des Herstellers und sein entsprechend ausgebildetes Fachpersonal benötigt. Die Ergebnisse werden in tabellarischer und grafischer Form ausgearbeitet.

Seit dem Einbau traten keine nennenswerten Beeinträchtigungen der Messeinrichtungen auf. Lediglich im Stollen wurde das Glasfaserkabel durchtrennt, als mit schwerem Bohrgerät hantiert werden musste. Die Schadstelle konnte problemlos repariert werden, allerdings stellt sie eine Fehlstelle im Glasfaserkabel dar und verursacht eine - wenn auch geringe - Dämpfung.

Für den langfristigen Betrieb hat die Lebensdauer der Bauteile eine Bedeutung. Die elektronischen PT100-Temperaturfühler sind Bauteile, die ihre Qualität und Verfügbarkeit in vielen Anwendungen bewiesen haben. Trotzdem besitzen sie Elemente, für die Beschädigungen z.B. durch Überspannungen infolge Blitzschlages nicht auszuschließen sind. Demgegenüber ist das einfach aufgebaute Glasfaserkabel robust und hat seine Langlebigkeit im Rahmen der Nachrichtentechnik gleichfalls unter Beweis gestellt.

5 Messergebnisse

5.1 Ergebnisse der Glasfaser-Temperaturmessungen

Die Ergebnisse der Glasfaser-Temperatur-Messung sollen exemplarisch an den Bohrungen D22 und D23 des Messquerschnitts D2 erläutert werden (s. Abbildung 4).

Die 33,5 m lange Bohrung D22 verläuft vom Drainage- und Kontrollstollen senkrecht nach oben und ist mit 7 elektronischen Messfühlern im Abstand von 5 m bestückt. Die Bohrung D23 hat eine Neigung von 45° zur Luftseite und eine Länge von 16 m. Sie ist mit 5 elektronischen Messfühlern ausgerüstet. Durch beide Bohrungen wurde zusätzlich das Glasfaserkabel verlegt.

Einige exemplarische Ergebnisse der Glasfaser-Temperaturmessung sind in Abbildung 6 bis Abbildung 9 dargestellt. Die feine Ortsauflösung des Messkabels lässt den Wärmefluss von außen in die Staumauer entlang der Messachse D23 erkennen (s. Abbildung 7). Der Kopfpunkt der Schrägbohrung D23 liegt etwa 2 m von der Aussenfläche der Staumauer entfernt. Die Temperatur in diesem Mauerbereich beträgt zum Anfang der Auftragungen im Januar 1999 rund 7 °C und sinkt bis zum Februar/März weiter ab. Der Temperaturgradient ist jetzt zwischen den Bohrlochtiefen 12 m und 15 m am steilsten und flacht zum Kopfpunkt wieder ab. Das gleiche Verhalten mit entgegengesetzter Neigung zeigt sich im Spätsommer. Mit der Septembermessung wird am Bohrlochkopf die höchste Temperatur von rund 13 °C erreicht. Die folgende Abkühlung führt im November/Dezember 1999 zu einer Wärmeinsel bei 13,5 m.

Die Messungen zeigen, dass sich der innere Mauerkörper nur sehr langsam erwärmt. Etwa 5 m vor dem Kopfpunkt der Bohrung, somit 7 m von der Aussenseite entfernt, ändert sich die Temperatur nur noch um ± 1 °C. Am Fusspunkt der Bohrung in Stollennähe werden die ersten 2 m durch die Temperatur im Kontroll- und Drainagestollen beeinflusst.

Ähnliche Temperaturen zeigt die Vertikalbohrung D22 (s. Abbildung 6). Ihr Kopfpunkt liegt nahe der wasserseitigen Oberfläche. Im Sommer 1999 fiel der Wasserstand in der Talsperre mehrere Meter, so dass der obere Teil der Staumauer von beiden Seiten durch die Luft erwärmt wurde. Zusätzlich heizte sich die südlich gerichtete Wasserseite der Staumauer durch die Sonneneinstrahlung auf, so dass die Temperaturen in der Bohrung bis auf über 20 °C stiegen. Deutlich erkennbar ist das Aufspreizen der Temperaturverläufe bei der Bohrungstiefe von etwa 15 bis 20 m. Der darunterliegende Mauerteil wird von den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen weniger betroffen.

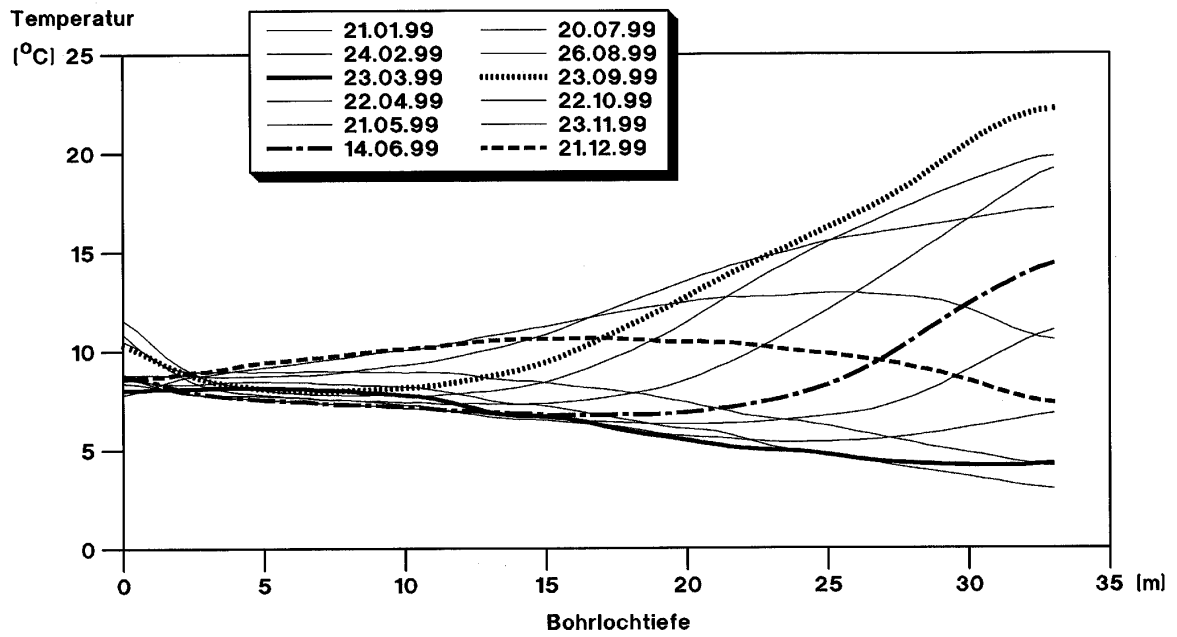


Abbildung 6: Temperaturen entlang der Bohrungsachse D22 zu verschiedenen Messterminen

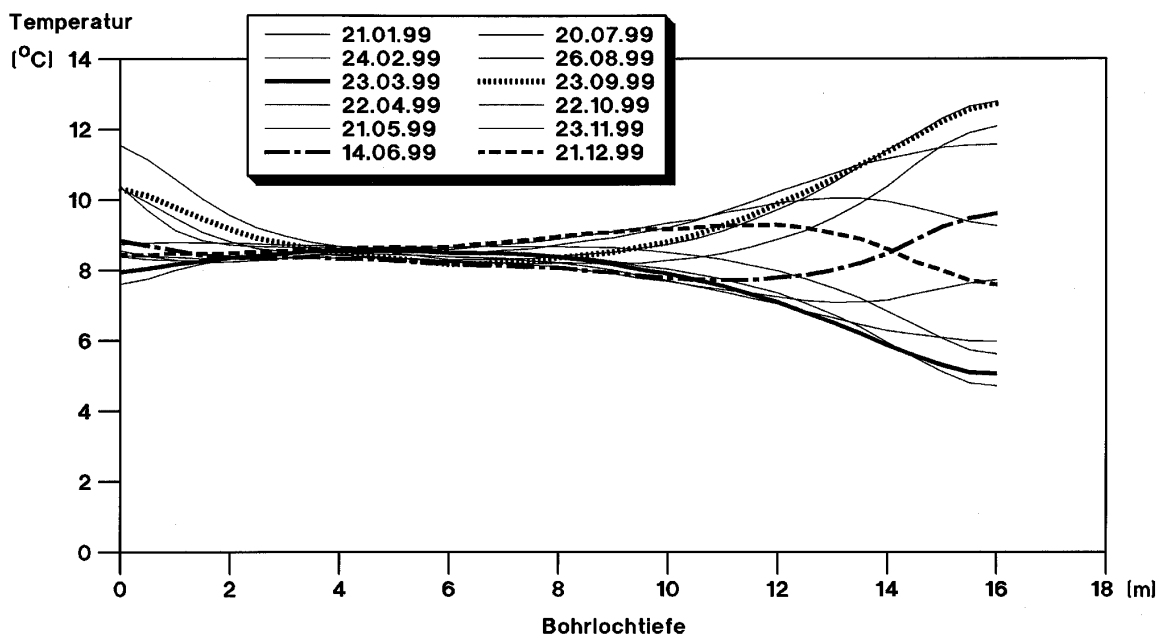


Abbildung 7: Temperaturen entlang der Bohrungsachse D23 zu verschiedenen Messterminen

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Temperaturen in den Bohrungen entlang der Zeitachse dargestellt. Die dick durchgezogenen Linie zeigt jeweils den Temperaturgang des Kopfpunktes der Bohrung, dick gestrichelt ist die Temperaturlinie des Bohrungsfusses am Kontrollstollen. Die dick gepunktete Linie zeigt die Temperatur im Inneren der Staumauer, 2,5 m vom Kontrollstollen entfernt. Die Messkurven der weiteren Abschnitte des Glasfaserkabels sind zwischen diesen Linien angeordnet. Die grafische Darstellung lässt deutlich den Temperaturgradienten im Januar vom Kontrollstollen (etwa 11 °C) nach Außen (etwa 4 bzw. 6 °C) erkennen. Nach einer weiteren Abkühlung der Mauer bis Ende Februar "schlägt" das Temperaturprofil im April/Mai "um". Die außen liegenden Mauerbereiche erwärmen sich, während die innen liegenden Bereiche bei einer Temperatur von etwa 8 bis 9 °C verharren.

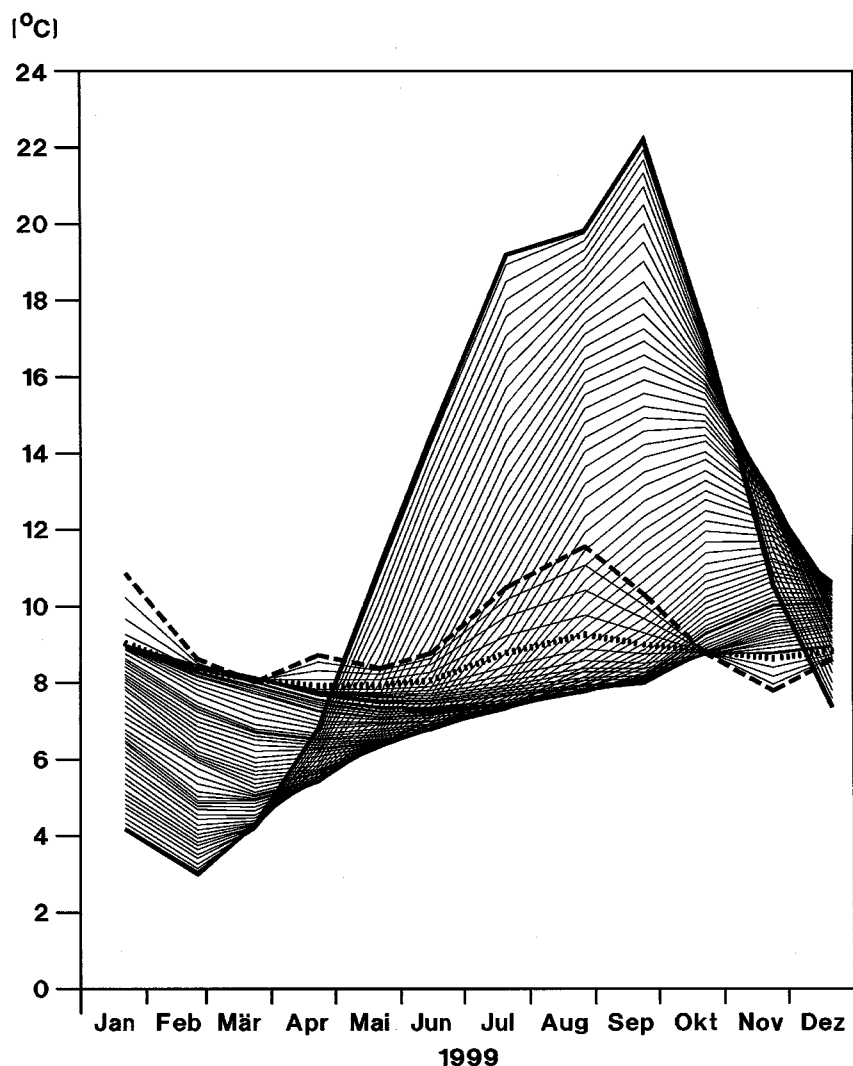


Abbildung 8: Temperaturen in der Bohrung D22 entlang der Zeitachse

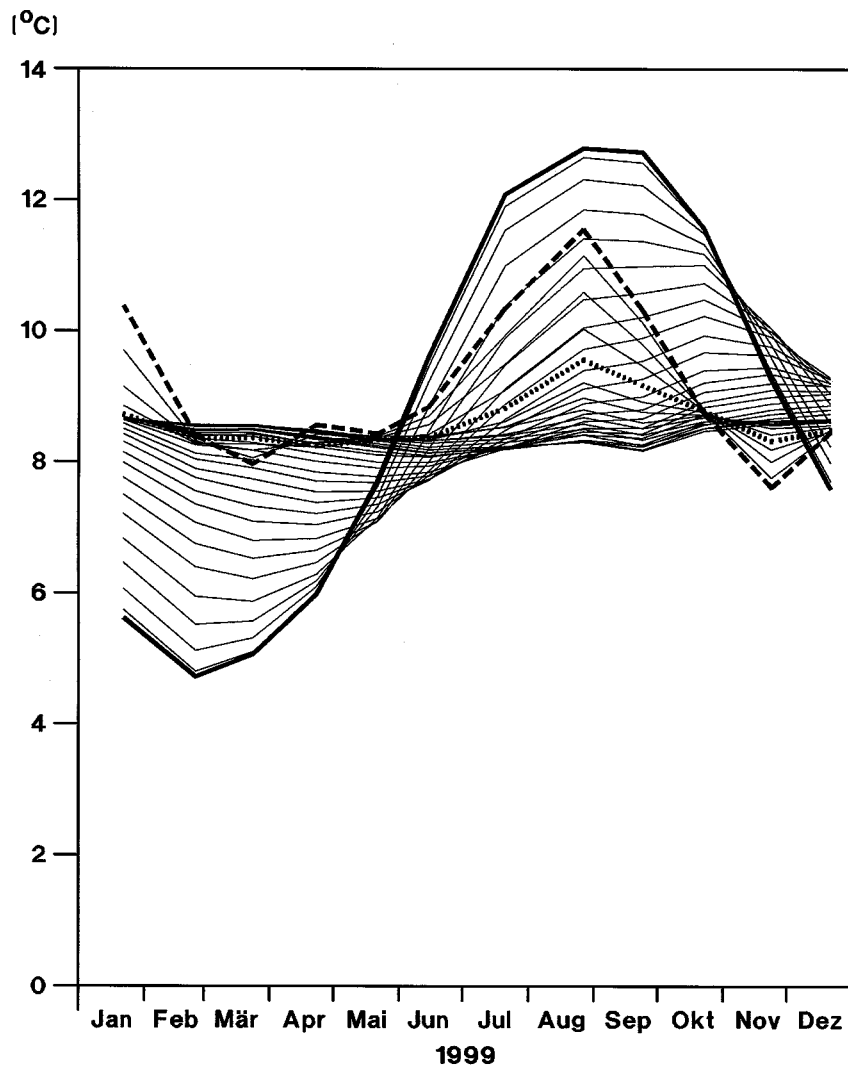


Abbildung 9: Temperaturen in der Bohrung D23 entlang der Zeitachse

Mit Hilfe der entlang der Bohrungen gemessenen Temperaturen lassen sich bequem die Temperaturverteilungen in der Staumauer zu den Messzeitpunkten konstruieren. Eine einfache lineare Interpolation ist in Abbildung 10 dargestellt. Die starken Temperaturgradienten im Frühjahr und Herbst sind an den engliegenden Temperaturgleichelinien zu erkennen.

Höherwertige Auswerteverfahren z.B. nach der Methode der Finiten Elemente liefern anhand von Messwerten zeitlich und räumlich noch wesentlich detailliertere Aussagen zur Temperaturverteilung [1].

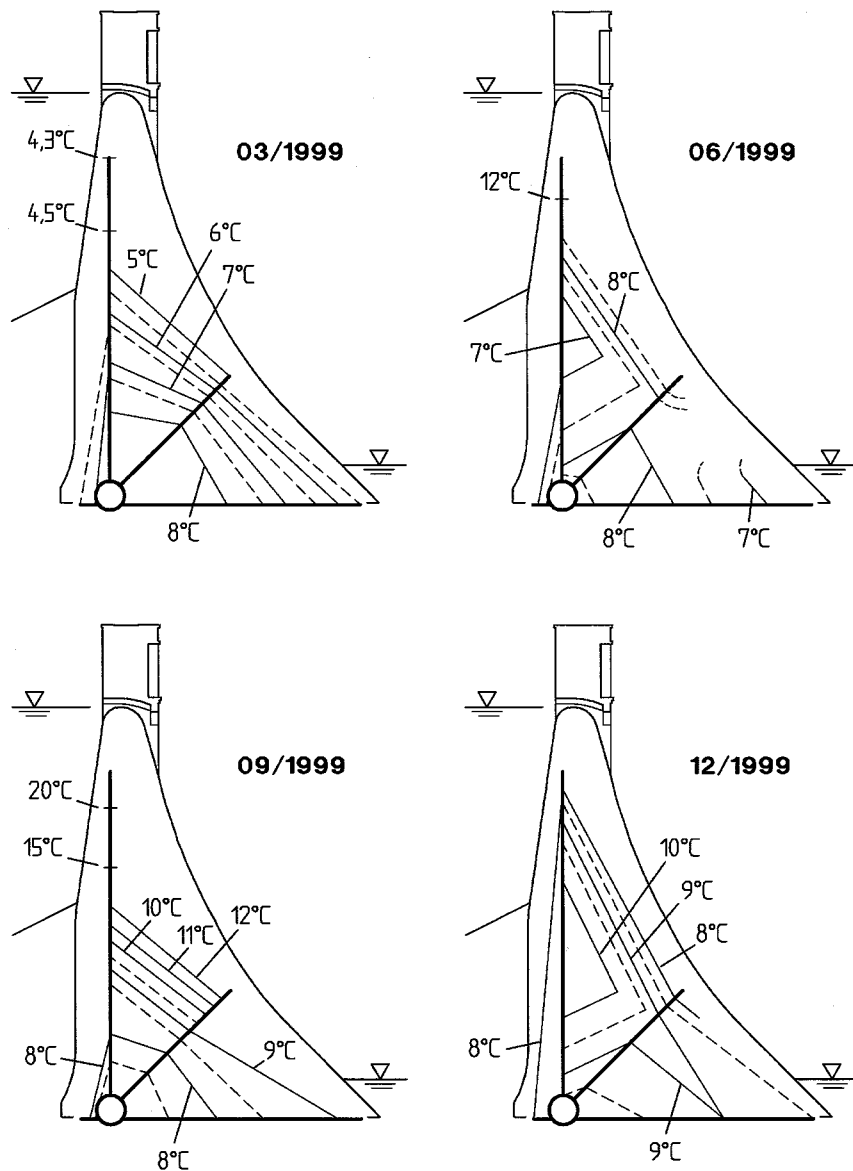


Abbildung 10: Temperaturverteilungen in der Staumauer (linear interpoliert)

5.2 Vergleich der Messtechniken

Zum Vergleich der Ergebnisse der Glasfaser-Temperatur-Messtechnik mit der konventionellen Messtechnik müssen zunächst die technischen Möglichkeiten verglichen werden. Das technisch einfach aufgebaute Glasfaserkabel kann mit Hilfe einer aufwendigen Lasermesseinrichtung zu Temperaturmessungen verwendet werden. An der Ennepetalsperre wurde die Messgenauigkeit auf 0,3°C und die Ortsauflösung auf 0,50 m eingestellt. Die Anzahl der Datenpunkte im zu untersuchenden Bereich mit einer Gesamtlänge von 217 m entspricht so 434 konventionellen Messgebern.

Die eingesetzten PT100-Messgeber der konventionellen Temperaturmessung erreichen eine reproduzierbare Genauigkeit von 0,1°C. Sie müssen jedoch einzeln verkabelt werden. Zum Messen ist zudem entweder eine tragbare Messbrücke notwendig, die manuell an die Anschlüsse eines jeden Gebers angeschlossen wird oder eine aufwendige Mess-EDV, die mit Hilfe von Datenloggern und PCs eine kontinu-

ierliche Messung erlaubt. Dies wurde an der Ennepetalsperre realisiert, der Messrhythmus auf $1/2$ -stündlich eingestellt.

Eine Gegenüberstellung der Messergebnisse an den Messpunkten der konventionellen Messeinrichtung ist in Abbildung 11 für die Messungen vom 21.05.1999 und 23.09.1999 aufgetragen. Zusätzlich wurde die jeweilige Trendlinie ermittelt. Für beide Messungen liegen die gegeneinander aufgetragenen Messwerte der beiden Messeinrichtungen nahezu auf einer Geraden. Die Messwerte sind also im Rahmen der Genauigkeit als identisch zu betrachten.

Die Trendlinien der beiden Messungen weisen ein Bestimmtheitsmaß von 98% auf und sind fast deckungsgleich, dies belegt, dass zwischen den Messungen keine Driftung der Messeinrichtungen auftrat.

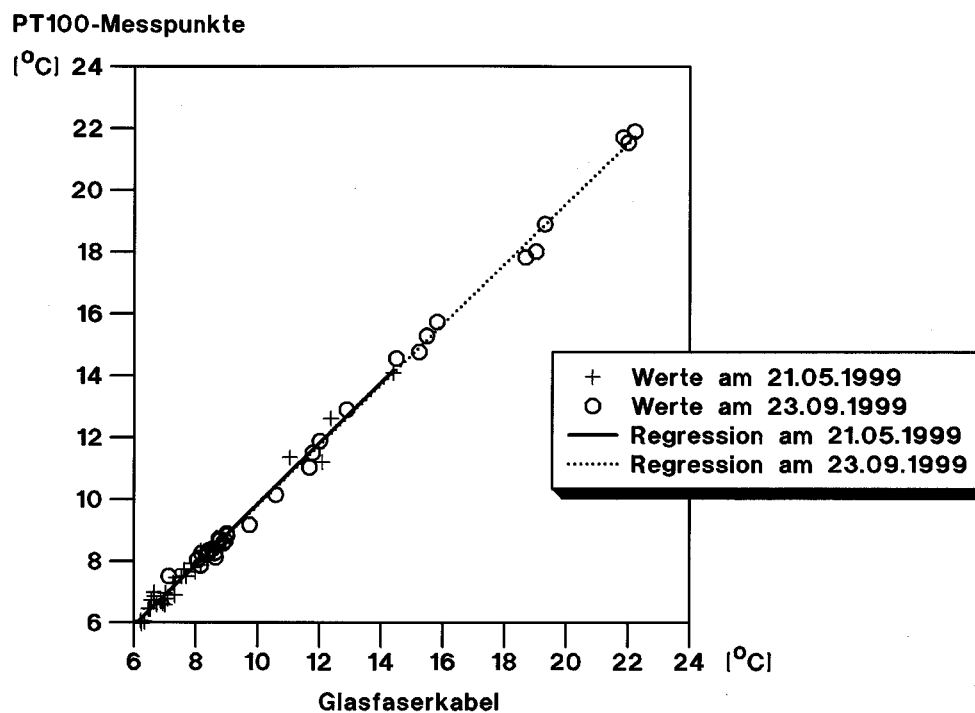


Abbildung 11: Vergleich der Messwerte der Temperaturmessungen vom 21.05.1999 und 23.09.1999

Der Vergleich der Messungen entlang der Bohrlochachsen ist beispielhaft für die Bohrung D22 mit den Messungen vom 21.05.1999 und 23.09.1999 in Abbildung 12 dargestellt. Die 67 Messpunkte des Glasfaserkabels geben den Temperaturverlauf praktisch kontinuierlich wieder. Ein entsprechender Verlauf kann anhand der sieben PT100-Messpunkte nur mit Hilfe einer Interpolation ermittelt werden. Wären statt der sieben Messfühler nur drei Fühler entsprechend der Empfehlungen des DVWK-Merkblattes eingebaut worden, so wäre die Bestimmung des Temperaturverlaufs zusätzlich erschwert worden.

Nur die Temperaturmessung mit Hilfe des Glasfaserkabels kann hier den vollständigen Temperaturverlauf entlang der Bohrung wiedergeben. Die Randeffekte am Anfang der Bohrung, in Kontrollstollennähe sind nur mit dem Glasfaserkabel zu beobachten.

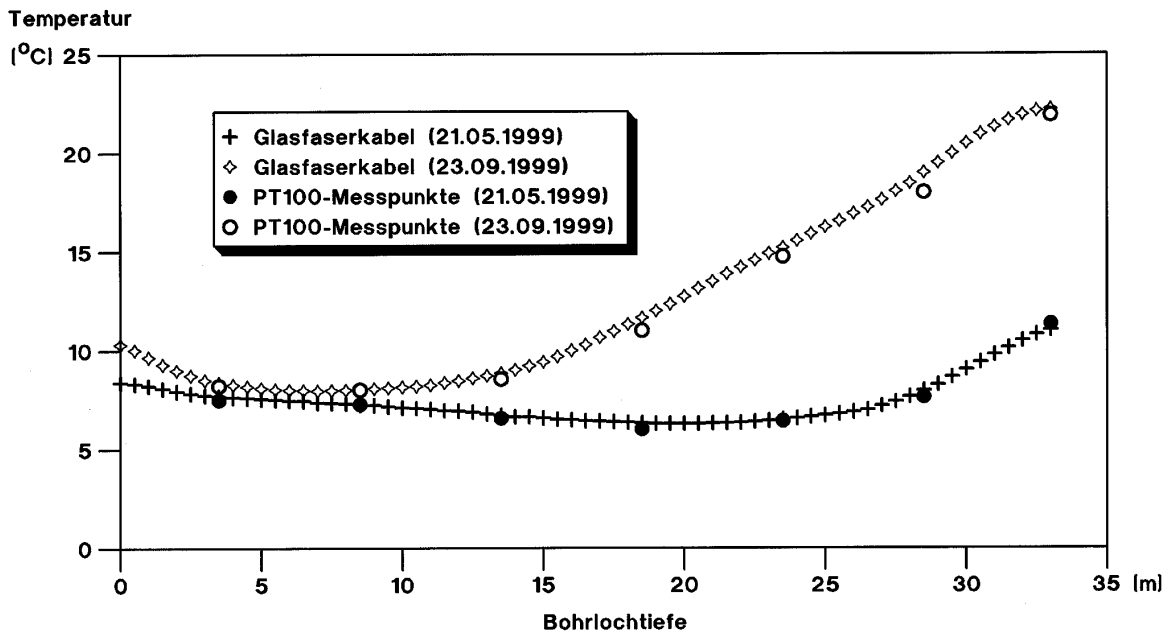


Abbildung 12: Temperaturen in Bohrung D22 am 21.05.1999 und 23.09.1999

6 Bewertung der Ergebnisse

Eine Bewertung der Ergebnisse der Glasfaser-Temperatur-Messung im Vergleich zur konventionellen Messtechnik kann nur vor dem Hintergrund der Anforderungen aus der Talsperrenüberwachung erfolgen. Hierzu schreibt das bereits erwähnte DVWK-Merkblatt 222 [4]:

„Da die Verschiebungen (von Staumauern) durch die Temperaturen des Mauerkörpers stark beeinflusst werden, müssen i.d.R. auch Temperaturen gemessen werden. ... Während des Baues der Mauer geben Temperaturmessungen zumindest indirekt Aufschluss über die zu erwartenden Zwängungsspannungen im Mauerquerschnitt. ... Die aus diesem Grund eingebauten Messgeräte können i.d.R. auf Dauer für die Temperaturmessungen im Betrieb verwendet werden“.

An anderer Stelle fordert das Merkblatt die Einrichtung von Temperaturfühlern in mindestens 3 Messlinien mit je 5 Messpunkten im Mauerkörper, womit die Temperaturverteilung in der Staumauer innerhalb der ersten 3 bis 5 Jahre nach der Errichtung einer Staumauer mittels monatlicher Messungen beobachtet werden soll.

Diese Anforderungen erfüllt sowohl die Glasfasermesstechnik, als auch die konventionelle Messtechnik. Auch in Bezug auf die Anforderungen beim Einbau sind beide Möglichkeiten als gleichwertig zu betrachten.

Unterschiede ergeben sich, wenn eine örtlich feinauflösendere Messung gewünscht wird oder wenn viele Messungen über einen langen Zeitraum durchgeführt werden sollen.

Bei der Einrichtung eines minimalen Messsystems mit 15 Messpunkten ist die konventionelle Messtechnik sicher die preiswerteste Lösung (s. Tabelle 1), besonders, wenn die Messungen von Hand ausgeführt werden.

| | konventionelle Technik | Glasfasertechnik |
|---|-------------------------------|--|
| Anzahl Messstellen | 40 | eff. Messbereich 217 m, entspr. 434 Messpunkten |
| praktisch erreichbare Temperaturauflösung | 0,1° | 0,3° |
| Kosten eines Messfühlers (PT100) | 280 DM | - |
| Gesamtkosten Messfühler/Glasfaserkabel | 11.200 DM | 8.000 DM |
| Gesamtkosten Temperaturmesseinrichtung (Messfühler + zusätzliche Teile, ohne Einbau) | 15.094 DM | 11.585 DM |
| Durchführung einer kompletten Messung einschließlich grafische Auswertung | 1.100 DM | 2.200 DM |
| stationäre Messeinheit einschließlich PC | 31.000 DM | ca. 40.000 DM (nicht realisiert) |

Tabelle 1: Kennwerte und Kosten der Temperatur-Messsysteme der Ennepetalsperre

Sollen räumlich feinauflösende Temperaturverteilungen ermittelt werden, so bietet die Glasfasertechnik eine preisgünstige Möglichkeit, Temperaturen zu messen.

Ein weiterer Vorteil der faseroptischen Temperaturmessung besteht darin, dass hier die Kalibriersicherheit als systematischer Fehler an allen Messpunkten gleich ist, während bei der konventionellen Technik jeder Geber mit einem individuellen Fehler behaftet ist. Dies verschlechtert bei den Messgebern die Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander.

Als Handicap der Glasfasertechnik offenbart sich z.Zt. allerdings noch die fehlende Möglichkeit einer Automatisierung dieser Messungen. Derzeit müssen die Messungen noch durch Fachfirmen ausgeführt werden. Nach Auskunft des Herstellers steht in Kürze ein preisgünstiges Gerät zur faseroptischen Temperaturmessung zur Verfügung, das auch zum stationären Einbau geeignet ist.

Zum aktuellen Zeitpunkt ist jedoch die vollständig automatisierte Messung mit Datenloggern und PC-Steuerung nur auf der Basis der konventionellen Messtechnik möglich. Daher wird die Temperaturmessung an der Ennepetalsperre nach dem Ende der Versuchsphase zunächst auf der Basis der PT100-Messgeber weiter betrieben. Die fest eingebauten Glasfaserkabel stehen jedoch ohne zusätzlichen Aufwand weiter zur Verfügung und können jederzeit wieder zur Messung verwendet werden.

7 Literatur

- [1] Bettzieche, V.; Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer, *Wasserwirtschaft* 87 (1997);
- [2] 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*
- [3] Bettzieche, V.; Berücksichtigung von Durchsickerung und Wärmefluss beim Nachweis alter Staumauern mit der Finite Element Methode; *Finite Elemente in der Baupraxis - FEM' 98; Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1998*
- [4] DVWK; Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen; *DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 222; 1991*
- [5] DVWK; Berechnungsverfahren für Gewichtsstaumauern - Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund; *DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 242; 1996*
- [6] Großwig, S. et al.; Die faseroptische Temperaturmeßtechnik - Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeiten im Umwelt- und Geobereich anhand ausgewählter Beispiele; *Scientific Reports; Journal of The Mittweida University of Technology and Economics; Volume III, 1/1997; Mittweida*
- [7] Hurtig, E. et al.; Borehole Temperature Measurements using Distributed Fibre Optic Sensing *Scientific Drilling*
- [8] Krohn, D.A.; Fibre optic sensors. Fundamentals and application. Monographie: (1988) Research Triangle Park; Instrument Society of America
- [9] Rissler, P., Heitefuss, C.; Upgrading of the Ennepe dam; *Hydropower & Dams Issue Two; Volume six; 1999*
- [10] Rogers, A.J.; Distributed Optical fibre Sensors for Measurement of Pressure, Strain and Temperature; *Physics Reports (Physics Lett.), Vol. 169, No.2, 1988, pp.99-143*
- [11] York, 1991; Technical Aspects of Optical Fiber Distributed Temperature Sensing; 1991; York Sensors Ltd.; York (UK)