

Vertiefte Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung

Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Ruhrverband, Essen

1. Einführung

Die messtechnische Überwachung der Talsperren ist eine der wichtigsten Aufgaben eines Talsperrenbetreibers. Eine moderne EDV unterstützt an vielen Anlagen diese Aufgaben der Datenerhebung durch elektronische Messgeber, Datenlogger und grafische Darstellung der Messdaten an einem PC. Die aktuelle Auswertung und Interpretation der Messwerte und damit des Bauwerkverhaltens ist so für den Talsperrenmeister leicht möglich.

Diese Sofortauswertung kann jedoch nur ein erster Schritt bei der messtechnischen Überwachung eines Absperrbauwerkes sein. Weitere Auswertungen der Daten unter Hinzuziehung zusätzlicher Aspekte sind im Sinne einer langfristigen Überwachung notwendig.

Zur Identifikation von langfristigen Entwicklungen des Absperrbauwerks stehen verschiedene Methoden zur Verfügung:

- Mathematisch-statistische Analyse
- EDV-gestützte Modelle
- Vergleichende Betrachtungen

Diese Methoden werden im DVWK-Merkblatt 222/1991 "Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen" [1] zur Anwendung vorgeschlagen:

- *Die Messmethoden, die Messgeräte, die Messgenauigkeit und das Auswerteverfahren sind in Abhängigkeit von den zu erwartenden Messgrößen zu wählen. Bei der Auswertung kann auch eine **mathematisch-statistische Analyse** erforderlich werden.*
- *Auch für die Interpretation des Verhaltens bestehender Mauern kann es sinnvoll sein, ein **Berechnungsmodell** aufzustellen, anhand der Messergebnisse zu kalibrieren und für die weitere Betriebszeit vorzuhalten.*
- *Unabhängig von der laufenden Überwachung der Stauanlage können z. T. gezielte Zusatzuntersuchungen vorgenommen werden, die **zum Vergleich mit anderen ähnlichen Stauanlagen** dienen.*

2. Mathematisch-statistische Analyse

Eine mathematisch-statistische Analyse der Messwerte basiert auf den Kontrollmessungen und Beobachtungen, wie sie jeder Talsperrenbetreiber durchzuführen hat. Im Gegensatz zu den jährlichen Betrachtungen des Sicherheitsberichtes betrachtet die mathematisch-statistische Analyse Messdaten über einen Zeitraum von z.B. 10 Jahren im Sinne der „Vertieften Überprüfung“ nach DVWK-Merkblatt 231 [2].

Über die Betrachtung von einzelnen Messwerten hinaus sollen

- langfristige Änderungen im Bauwerksverhalten sowie
- Ursachen und Wirkgrößen, welche die beobachteten Messgrößen beeinflussen, erkannt und quantifiziert werden.

Dieses Ziel sei an einem Beispiel erläutert:

Bei der grafischen Darstellung der Verschiebungen der Krone einer Staumauer während eines Beobachtungszeitraumes ist es üblich, im gleichen Diagramm den Staupegel und den Verlauf der Lufttemperatur darzustellen (s. Abbildung 1, die Lufttemperatur ist anhand des Mauertemperaturfühlers 1 dargestellt). Der visuell durchgeführte Vergleich der Kurven zeigt, dass die Mauerverschiebungen durch die wechselnde Temperatur beeinflusst werden, da die Stauhöhe kaum variiert. Eine häufige Formulierung in den Sicherheitsberichten lautet dann „Die ... Messungen zeigen ... elastische Verformungen, die ... auf Temperatureinflüsse zurückzuführen sind“.

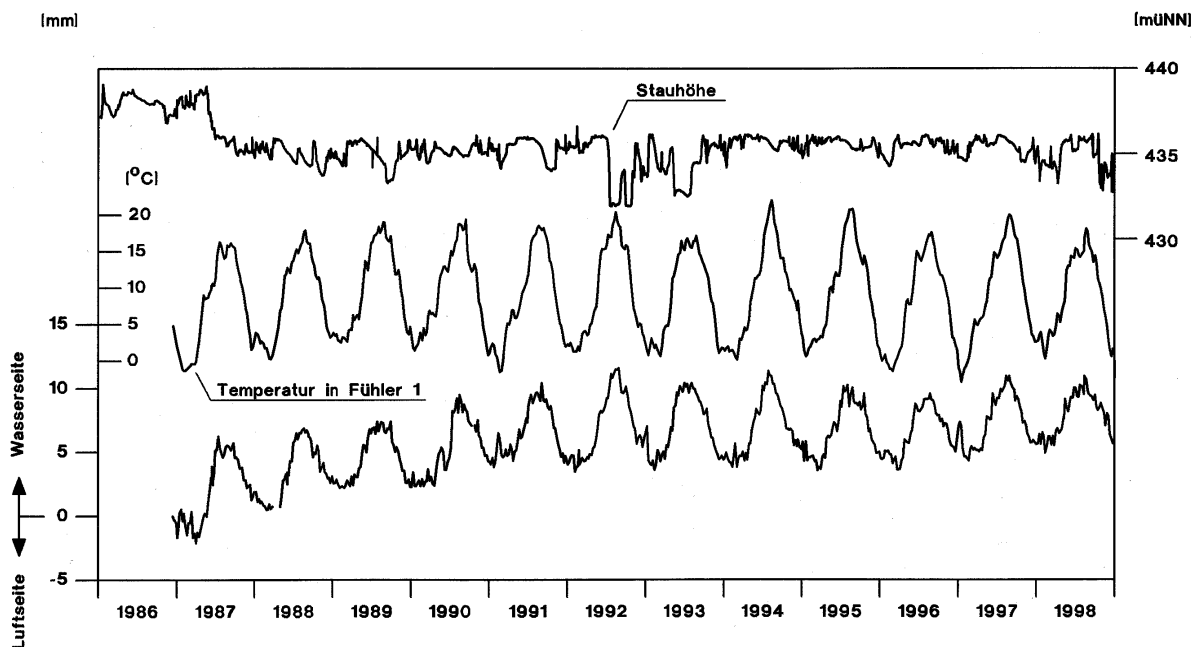


Abbildung 1: Radiale Verschiebungen der Mauerkrone einer Staumauer

Solche, zunächst nur qualitativ möglichen Beurteilungen werden durch eine vertiefte Überprüfung der Messergebnisse quantifizierbar, wenn sie sich auf eine mathematisch-statistische Analyse gründet. Erst hierdurch können die Ergebnisse nachvollziehbar interpretiert und bewertet werden.

3. Ein Überblick über die statistischen Grundlagen

3.1. Einsatz der „multiplen Regression“ zur Erstellung eines Trendmodells

Der Zusammenhang zwischen Wirkgrößen und Messgrößen kann mit Hilfe der Statistik zahlenmäßig erfasst werden.

Ein wesentliches Verfahren der Trendbestimmung ist die Verwendung eines linearen Regressionsmodells. Hierbei werden die Wirkgrößen linear kombiniert, wobei die Koeffizienten so gewählt werden, dass sich eine möglichst gute Anpassung des Trendmodells an die beobachtete Messreihe ergibt.

Die Verwendung von linearen Trendmodellen ist erfahrungsgemäß gut zur Beschreibung geeignet, während in der entsprechenden Literatur insbesondere vor Trendextrapolationen (Prognosen) mittels höherwertiger polynominaler Funktionen gewarnt wird, da Polynome außerhalb des Anpassungsbereiches rasch nach $\pm \infty$ gehen [12].

3.2. Test des Trendmodells

Zur ermittelten Regression sind vier Fragen zu klären:

1. Besteht ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten und den Ergebnissen des Regressionsmodells ?
2. Ist dieser Zusammenhang systematisch oder nur "zufällig" ?
3. Sind die einzelnen Wirkgrößen gleichwertig zu betrachten oder haben einzelne deutlichen Einfluss, während andere geringeren Einfluss haben ?
4. Sind maßgebliche Wirkgrößen übersehen worden ?

Diesen vier Fragen wird mit Hilfe der Varianzanalyse nachgegangen. Hierbei werden diese Verfahren nur soweit eingesetzt, wie sinnvolle Ergebnisse erwartet werden. Wird zum Beispiel bereits die Frage nach dem Zusammenhang (Frage 1) nicht bestätigt, so erübrigen sich meist die weiteren Untersuchungen (Fragen 2 bis 4).

➤ **Bestimmtheitsmaß**

Das Bestimmtheitsmaß gibt an, ob zwischen zwei Zahlenreihen ein Zusammenhang besteht. Nimmt man als eine Zahlenreihe die gemessenen Werte, als zweite Reihe die aus der Regressionsberechnung ermittelten Werte, so kann für den Zusammenhang das Bestimmtheitsmaß ermittelt werden. Ein Maß nahe 1 zeigt an, dass ein Zusammenhang zwischen beiden besteht, ein Maß nahe 0 zeigt, dass kein Zusammenhang vorliegt, die Regression also verworfen werden muss.

Das Bestimmtheitsmaß zu einer mehrdimensionalen Regression entspricht dem Quadrat der Korrelation zweier Größen. Der Wertebereich liegt gleichfalls zwischen 0 und 1.

➤ **F-Statistik**

Die Qualität der ermittelten Anpassung kann mit Hilfe der Varianzanalyse bewertet werden. Sie prüft, ob die errechneten Werte näherungsweise an die Messwerte heranreichen, und zwar „verhältnismäßig“ genau.

Hierzu wird die Hypothese aufgestellt, dass zwischen den Wirkgrößen und der Messgröße eigentlich kein Zusammenhang besteht, sondern dass sie nur zufällig einen starken Zusammenhang zeigen. Um die Wahrscheinlichkeit zu beschreiben, mit der irrtümlich ein Zusammenhang ermittelt wird, wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit verwendet. Diese wird in den nachfolgenden Betrachtungen mit 5 % angesetzt. Ausgehend von einer F-Verteilung kann nun anhand der Anzahl der Wirkgrößen und der Messwerte der kritische F-Wert angegeben werden. Liegt der aus dem Regressionsmodell berechnete F-Wert über dem kritischen F-Wert, so kann von einem Zusammenhang zwischen den Wirkgrößen und der Messgröße ausgegangen werden.

➤ **t-Verteilung von Student und Auswertung des Standardfehlers der Koeffizienten**

Die Qualität der ermittelten Regressionskoeffizienten wird mit Hilfe der t-Verteilung analysiert. Diese Verteilung liefert anhand der Irrtumswahrscheinlichkeit, die auch hier zu 5% angenommen wird, einen kritischen t-Wert, der für alle Wirkgrößen gilt. Für jede Wirkgröße wird ein eigener t-Wert ermittelt. Liegt dieser über dem kritischen t-Wert, so ist der Regressionskoeffizient dieser Wirkgröße geeignet.

Eine weitere Auskunft zur Qualität des Regressionskoeffizienten ergibt sich, wenn man den Standardfehler des Koeffizienten ermittelt und hiermit den 90%-Vertrauensbereich abschätzt. Der Abstand zwischen Untergrenze (5%-Fraktile) und Obergrenze (95%-Fraktile) des Vertrauensbereichs des Koeffizienten sowie die Werte in diesem Vertrauensbereich sollten physikalisch sinnvoll sein.

➤ **Residuenanalyse mit Normalverteilung und Chi-Quadrat-Test**

Bei der Gegenüberstellung der Messwerte mit den Ergebnissen der Regressionsberechnung ergeben sich nahezu immer Differenzen. Diese beruhen auf Zufälligkeiten, die selbst bei sorgfältigster Messung nicht auszuschließen sind. Durch die Differenzbildung zwischen Mess- und Regressionswerten erhält man die Residuen des Regressionsmodells. Diese „Reste“ müssen dann daraufhin untersucht werden, ob weitere systematische Einflüsse in ihnen enthalten sind. Für diese müsste dann eine weitere Wirkgröße im Regressionsmodell vorgesehen werden.

Sind keine wesentlichen Einflüsse übersehen worden, beruhen also die Residuen auf „reinem Zufall“, so müssen sie einer Normalverteilung entsprechen.

Zur Beschreibung der den Residuen zugrundeliegenden Normalverteilung werden Mittelwert und Standardabweichung der Residuen ermittelt.

Die Gegenüberstellung dieser Normalverteilung mit der tatsächlichen Verteilung der Residuen kann dann mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests beurteilt werden. Wird im Test eine ausreichende Signifikanz erreicht, so sind die Residuen normalverteilt und die maßgeblichen Wirkgrößen mit Hilfe der Regressionsberechnung ermittelt.

3.3. Mathematisch-statistische Analyse der Verformungen der Fürwiggestau- mauer

Die in den Jahren 1902 bis 1904 errichtete Fürwiggestalsperre 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. Im Jahr 1986 wurde in der Staumauer eine Lotanlage, bestehend aus Gewichts- und Schwimmot, eingerichtet. Das Gewichtslot hängt in einer Bohrung, die von der Krone zu einer eigens ausgebrochenen Nische am linken Grundablassstollen eingerichtet wurde. Das Schwimmot befindet sich ebenfalls in einer Bohrung, die von der gleichen Nische etwa 30 m in den Felsuntergrund verläuft. Die Messungen werden wöchentlich durchgeführt.

Die statistischen Kenngrößen der gemessenen Verformungen sind in der Übersicht in Tabelle 1 aufgeführt.

Messbereich		Anzahl Messwerte	Minimalwert	Mittelwert	Maximalwert
Stauhöhe	m ü. NN	516	431,95	435,13	436,13
Lufttemperatur	°C	516	-11,0	9,9	28,8
Schwimmot: radiale Verschiebungen	mm	516	243,88	246,31	248,62
Gewichtslot: radiale Verschiebungen	mm	516	235,94	239,99	243,28
Summe: radiale Verschiebungen	mm	516	-10,86	-6,32	-2,64

Tabelle 1: Abgelesene Werte der Lotmessungen (+: luftseitig / -: wasserseitig)

Während des ausgewerteten Zeitraums veränderte sich die Stauhöhe um nur etwa 4 m. Die gemessenen Temperaturen schwankten um etwa ± 20 °C um den Mittelwert von 10 °C. Unter dem Einfluss dieser Wirkgrößen bewegte sich die Mauerkrone um fast ± 4 mm in Richtung Wasser- und Luftseite.

Die radialen Verschiebungen der Staumauer werden durch erfahrungsgemäß drei Größen beeinflusst:

- die Stauhöhe,
- die Lufttemperatur sowie
- die Zeit.

In der multiplen Regression werden nun alle drei Wirkgrößen betrachtet (s. Tabelle 2).

Verschiebungen radial	Steigungsmaß (Regressionskoeffizient) gegenüber			Bestimmtheitsmaß
	Stauhöhe mm pro m ü. NN	Lufttemperatur mm pro °C	Zeit mm pro Jahr	
Schwimmlot	0,157	-0,014	0,052	0,19
Gewichtslot	0,444	-0,200	-0,158	0,63
Summe	0,601	-0,214	-0,106	0,58

Tabelle 2: Multiple Regression der Größen der radialen Lotmessung (+: luftseitig / -: wasserseitig)

Das Bestimmtheitsmaß von 63% für das Gewichtslot deutet auf einen Zusammenhang hin.

Anhand der F-Statistik wird der Zusammenhang zwischen Wirk- und Messgrößen überprüft. Der kritische F-Wert für eine Signifikanz von 5 % ergibt sich bei den hier vorhandenen

3 Wirkgrößen und
516 gültigen Messwerten zu
2,66 (kritischer F-Wert).

Demgegenüber stehen die berechneten F-Werte von

39,4 (berechneter F-Wert) für die radialen Verschiebungen des Schwimmlotes,

291,8 (berechneter F-Wert) für die radialen Verschiebungen des Gewichtslotes und

233,9 (berechneter F-Wert) für die radialen Verschiebungen der Summe.

Die wesentlich höheren berechneten F-Werte zeigen für die radialen Verschiebungen, dass die Zusammenhänge zwischen Wirkgrößen und Messgrößen nicht zufällig sind.

Mit Hilfe der t-Verteilung werden die Regressionskoeffizienten der Wirkgrößen einzeln bewertet (s. Tabelle 3).

radiale Verschiebung	t-Wert	5%-Fraktile	Steigungsmaß (Regressionskoeffizient)	95%-Fraktile	
Schwimmlot					
Stauhöhe	6,1	0,107	0,157	0,208	mm pro m ü. NN
Temperatur	4,4	-0,020	-0,014	-0,008	mm pro °C
Zeit	6,6	0,037	0,052	0,068	mm pro Jahr
Gewichtslot					
Stauhöhe	7,6	0,330	0,444	0,559	mm pro m ü. NN
Temperatur	28,4	-0,213	-0,200	-0,186	mm pro °C
Zeit	8,8	-0,193	-0,158	-0,123	mm pro Jahr
Summe					
Stauhöhe	8,5	0,464	0,601	0,739	mm pro m ü. NN
Temperatur	25,2	-0,230	-0,214	-0,197	mm pro °C
Zeit	4,9	-0,148	-0,106	-0,063	mm pro Jahr
kritischer t-Wert	1,65				

Tabelle 3: Ergebnisse der Analyse der einzelnen Wirkgrößen für die radiale Verschiebung des Lotes
(+: luftseitig / -: wasserseitig)

Gegenüber dem kritischen t-Wert ergibt sich bei allen Regressionskoeffizienten ein größerer berechneter t-Wert. Die Regressionskoeffizienten sind daher geeignet. Besonders deutlich heben sich die t-Werte der Temperatur hervor. Der Einfluss der Stauhöhe ist wohl aufgrund der geringen Stauhöhenänderungen nicht so deutlich.

Auch der 90%-ige Vertrauensbereich der Regressionskoeffizienten enthält für alle Messwerte sinnvolle Größen in engen Bereichen.

Die Regressionsanalyse der Lotmessung führt für die radialen Verschiebungen zu beachtenswert guten Ergebnissen. Die Regressionskoeffizienten sind statistisch gut abgesichert, was sich auch im eng begrenzten Vertrauensbereich zeigt. Mit zunehmender Stauhöhe verschiebt sich die Mauerkrone zur Luftseite (0,60 mm je m / zum Vergleich: Möhnetalsperre: 0,442 mm je m) und mit zunehmender Temperatur zur Wasserseite (0,214 mm pro °C / zum Vergleich: Möhnetalsperre: 0,275 mm pro °C). Auch ein zeitlicher Faktor wird für die Verschiebung nachgewiesen, demnach bewegte sich die Mauerkrone in den letzten 10 Jahren etwa 0,11 mm jährlich zur Wasserseite.

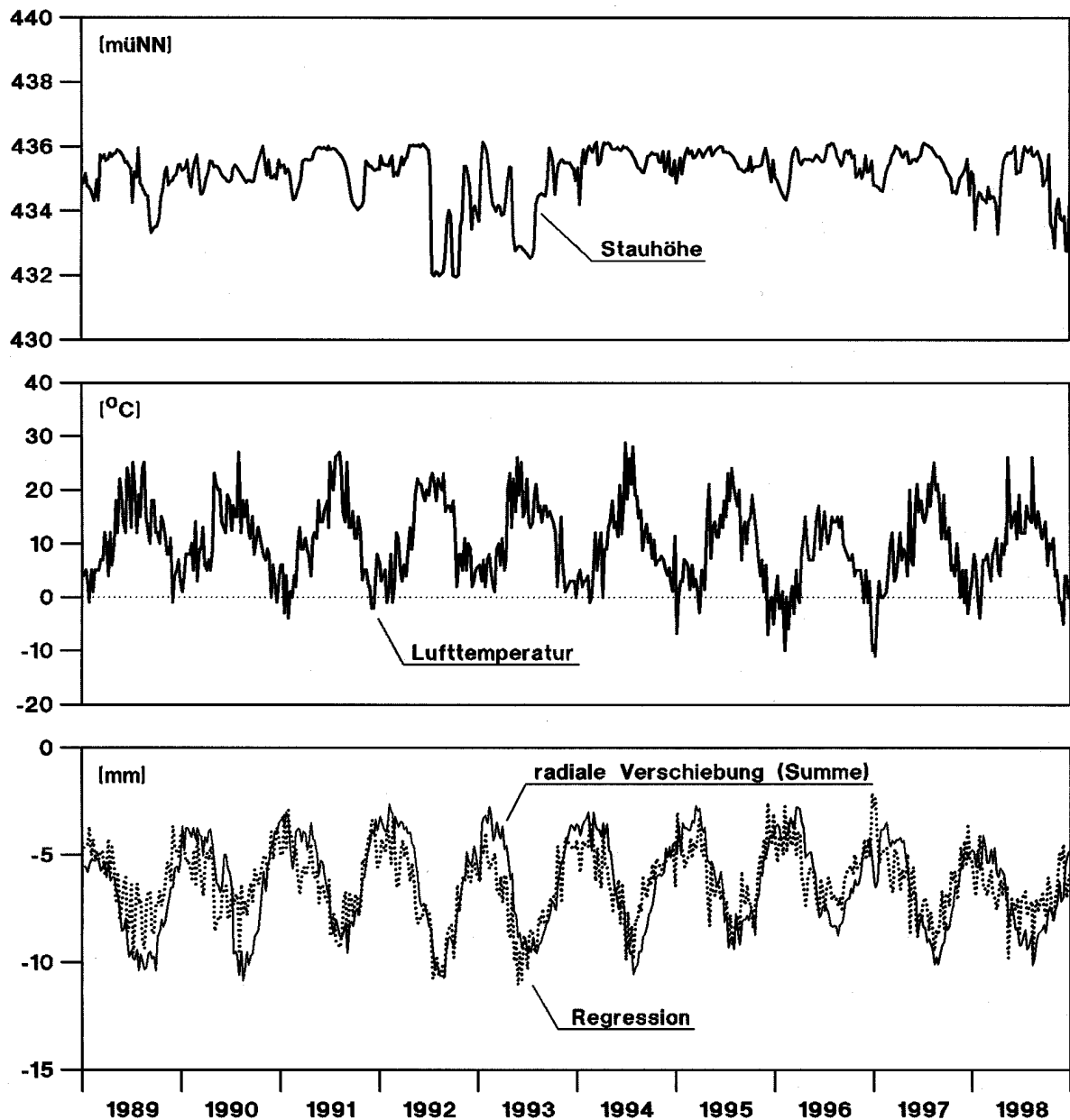


Abbildung 2: Wirkgrößen, Summenganglinie der radialen Verschiebungen des Gewichts- und Schwimmlots und Regression

Die Langzeitbetrachtung der Verformungsmessungen mit Hilfe der mathematisch-statistischen Analyse zeigt den Einfluss der relevanten Wirkgrößen auf das Bauwerk Fürwiggestaumauer. Wie jedes Tragwerk reagiert auch die Staumauer auf eine Belastung oder deren Änderung mit entsprechenden Verformungen. Hierbei muss die Last nicht unbedingt als äußere Belastung, wie der Wasserdruck, erkennbar werden. Auch Eigenspannungen im Bauwerk, die durch Temperaturänderungen der Luft und des Wassers hervorgerufen werden, belasten ein Tragwerk unter Umständen erheblich [7].

Die Fürwiggestaumauer reagiert auf diese Belastungen, indem sie sich zur Wasser- oder Luftseite bewegt. Die hier durchgeführte Analyse ergibt die in Abbildung 3 dargestellten Bewegungen.

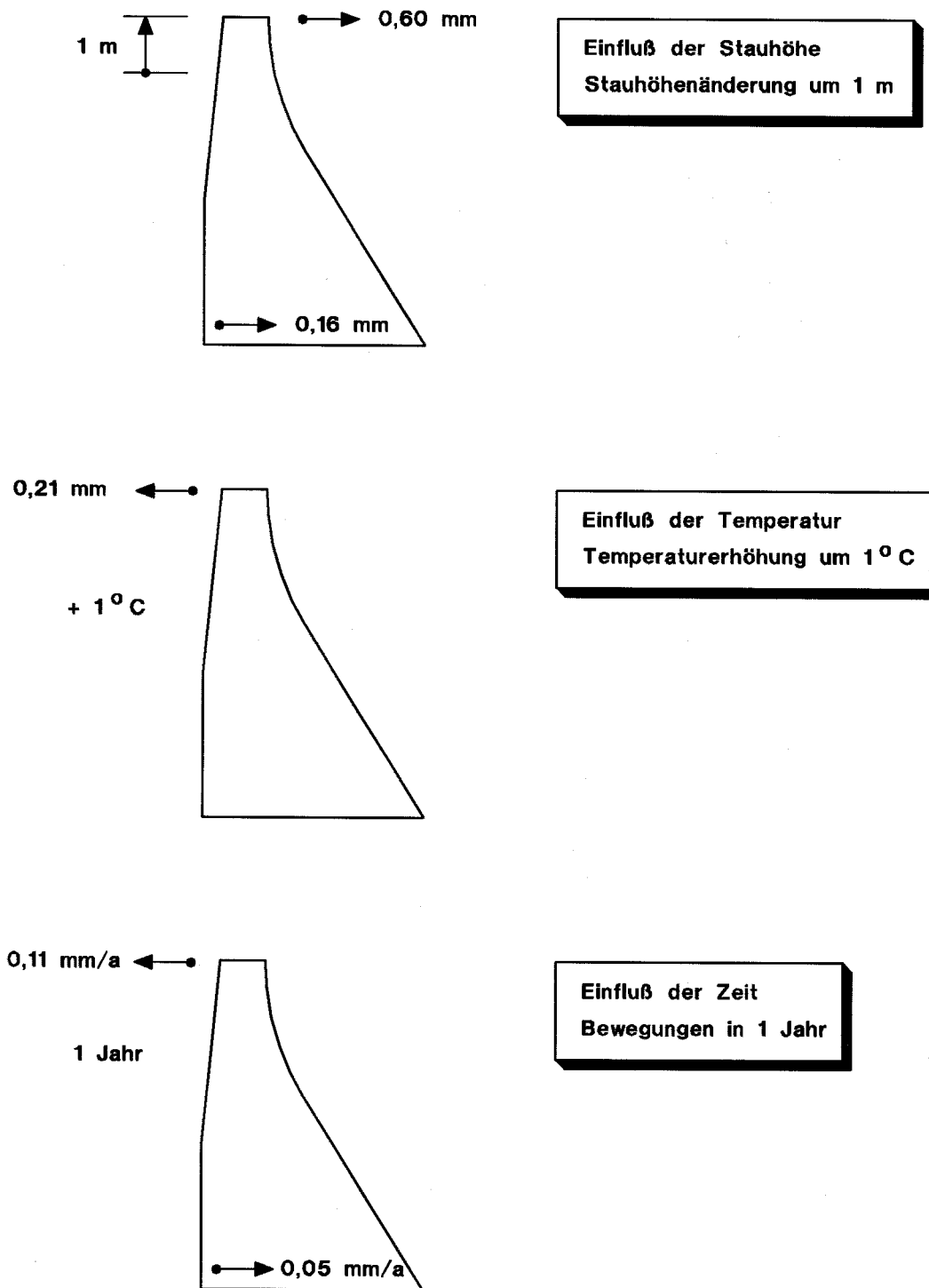


Abbildung 3: Bewegungen der Fürwiggestaumauer unter der Wirkung von Stauhöhe, Temperatur und Zeit (Auswertung der Messungen in den Jahren 1989 bis 1998)

4. EDV-gestützte Modelle

Das Verhalten eines Absperrbauwerks unter den verschiedenen Belastungen kann mit Hilfe elektronischer Simulationen vorhergesagt oder nachvollzogen werden. Der Vergleich dieser Berechnungen mit den Messungen liefert Erkenntnisse über das Verhalten des Bauwerks, der Materialien und ermöglicht die Prognose von zukünftigen Entwicklungen.

Bei Vergleichsberechnungen werden üblicherweise drei Modelle, basierend auf der Methode der Finiten Elemente (FEM), eingesetzt:

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

4.1. Strömungsmodell

Die Anwendung eines FEM-Strömungsmodells soll am Beispiel der Ennepestaumauer gezeigt werden. Die Ennepetalsperre, deren Absperrbauwerk eine 320 m lange und 51 m hohe Gewichtsstaumauer aus Bruchsteinen ist, wurde zwischen 1902 und 1904 erbaut. 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 4).

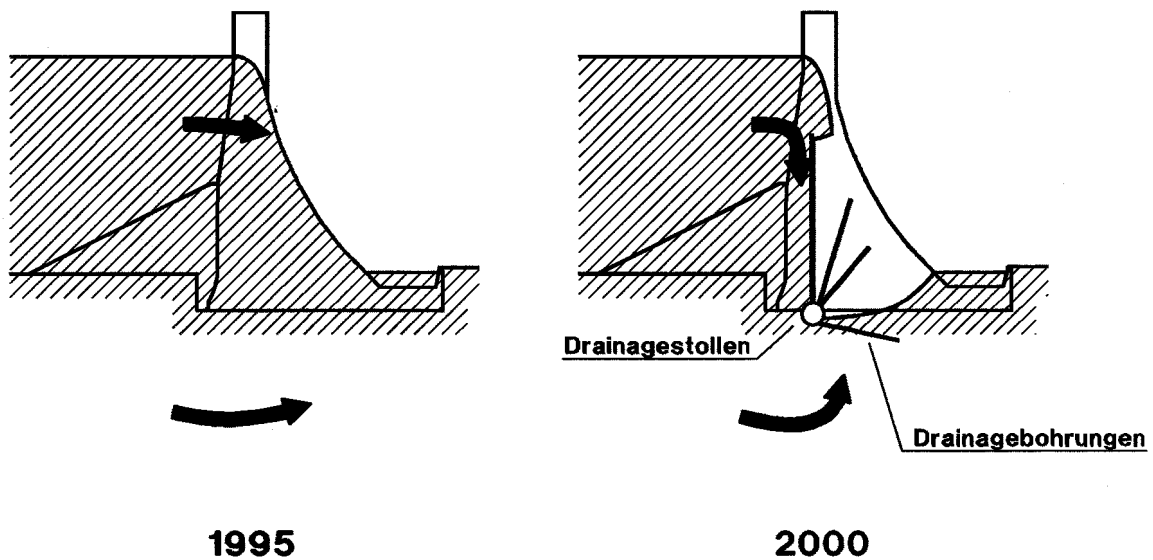


Abbildung 4: Konzept der Sanierung der Ennepestaumauer

Das zur Planung der Sanierung entwickelte Strömungsmodell bildet einen repräsentativen Mauerquerschnitt samt Intzekeil sowie ein Ausschnitt des Untergrundes durch ein ebenes FE-Modell ab und berücksichtigt ebenfalls die zur Kontrolle eingebauten Porenwasserdruckgeber (s. Abbildung 7). Den verschiedenen Materialbereichen (Mauerwerk, Intzekeil, Fels) wurden Durchlässigkeiten zugeordnet, die anhand von hydrogeologischen Untersuchungen festgestellt werden. Mit Hilfe des geeichten Modells konnte die Durchströmungssituation für unterschiedliche Stauhöhen, einschließlich verschiedener Hochwasserszenarien berechnet werden.

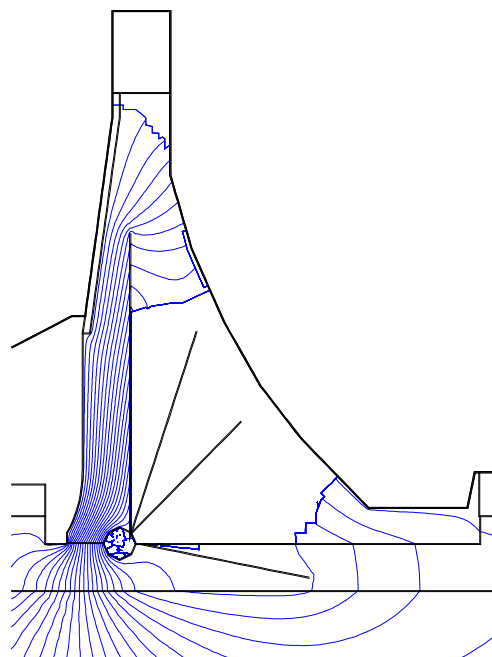


Abbildung 5: Isoglyphen der Standrohrspiegelhöhen bei Vollstau

Wesentlicher Bestandteil der Modelluntersuchungen war der Nachweis der flächigen Wirkung der senkrechten Drainagebohrungen, die an der Ennepestaumauer fächerförmig im Abstand von 4 m angeordnet sind. Abbildung 6 verdeutlicht die errechneten Druckdifferenzen zwischen der Ebene, in der die Drainagen eingerichtet sind und der Ebene mittig zwischen den Drainagefächern. Die flächige Wirkung ist dadurch belegt, dass die Druckunterschiede nur im Nahbereich der Bohrungen signifikant sind.

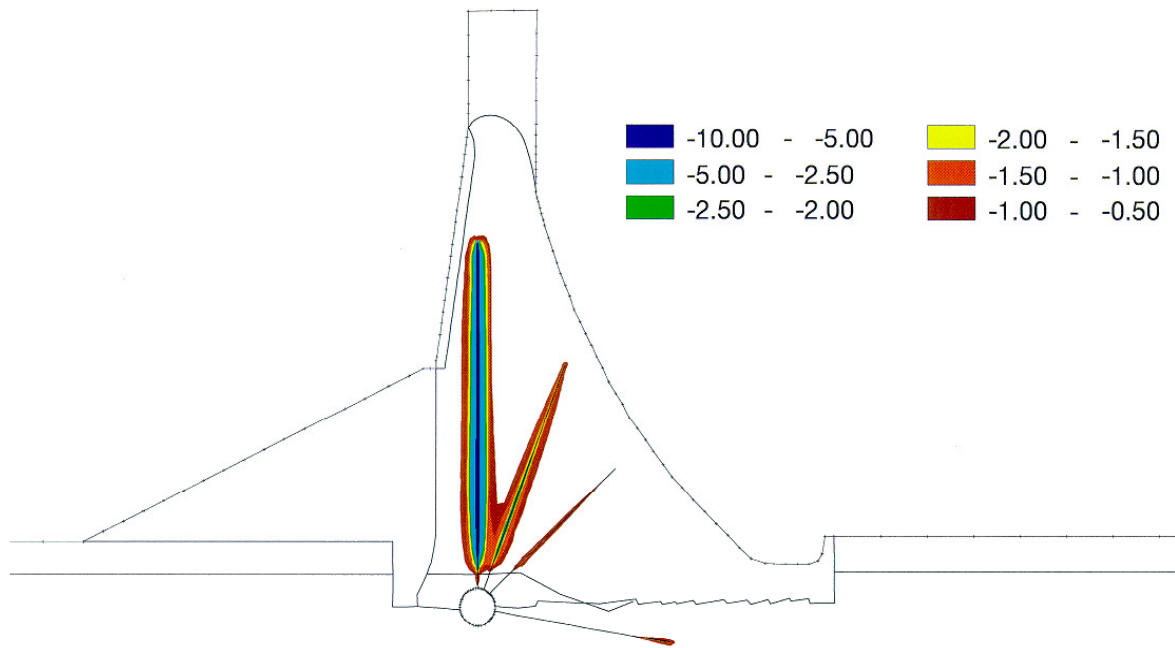


Abbildung 6: Differenzen der Porenwasserdruckhöhen (in m Ws) zwischen der Schnittebene der Drainagen und der Schnittebene zwischen den Drainagen

In der Ennepestaumauer werden die Wassermengen gemessen, die aus jeder einzelnen Drainagebohrung ausfließen.

Ein Vergleich dieser Messungen mit den anhand des Strömungsmodells erwarteten Werten ergibt sich durch die Mittelung der gemessenen Bohrlochabflüsse (s. Tabelle 4). Die an den Drainagen im Mauerwerk gemessenen Mengen liegen bei etwa 10% der Prognosen des Modells. Die Staumauer ist also dichter als in der Berechnung angenommen. Die Sickerwasserwerte der Stollenoberfläche sind von gleicher Größenordnung wie in der Berechnung. Hier fließt das Wasser dem Stollen durch den Untergrund zu, dessen Durchlässigkeit den Annahmen entspricht.

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

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

Auch die im Inneren der Staumauer gemessene Wasserdruckverteilung entspricht den Annahmen. Nennenswerte Porenwasserdrücke werden gemäß der in Abbildung 5 dargestellten Prognose lediglich in den wasserseitigen Porenwasserdruckgebern gemessen. Die Messstellen im Inneren der Mauer liefern keine oder nur geringfügige Drücke (s. Abbildung 8).

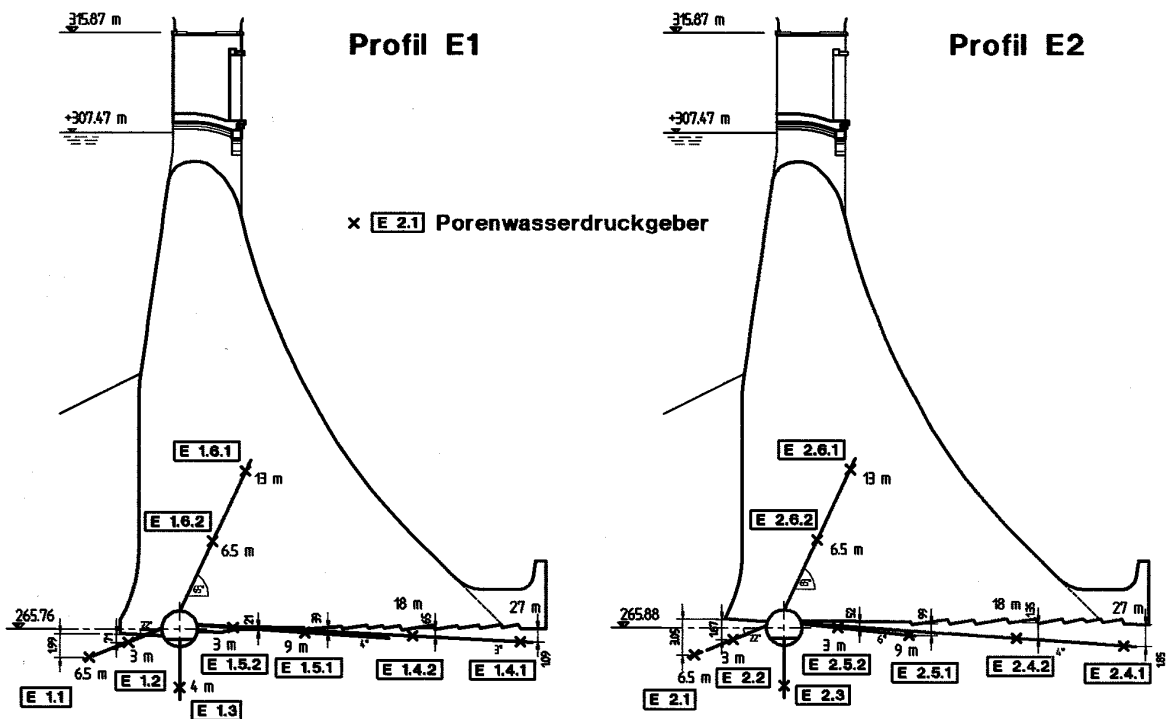


Abbildung 7: Porendruckgeber in der Ennepestaumauer

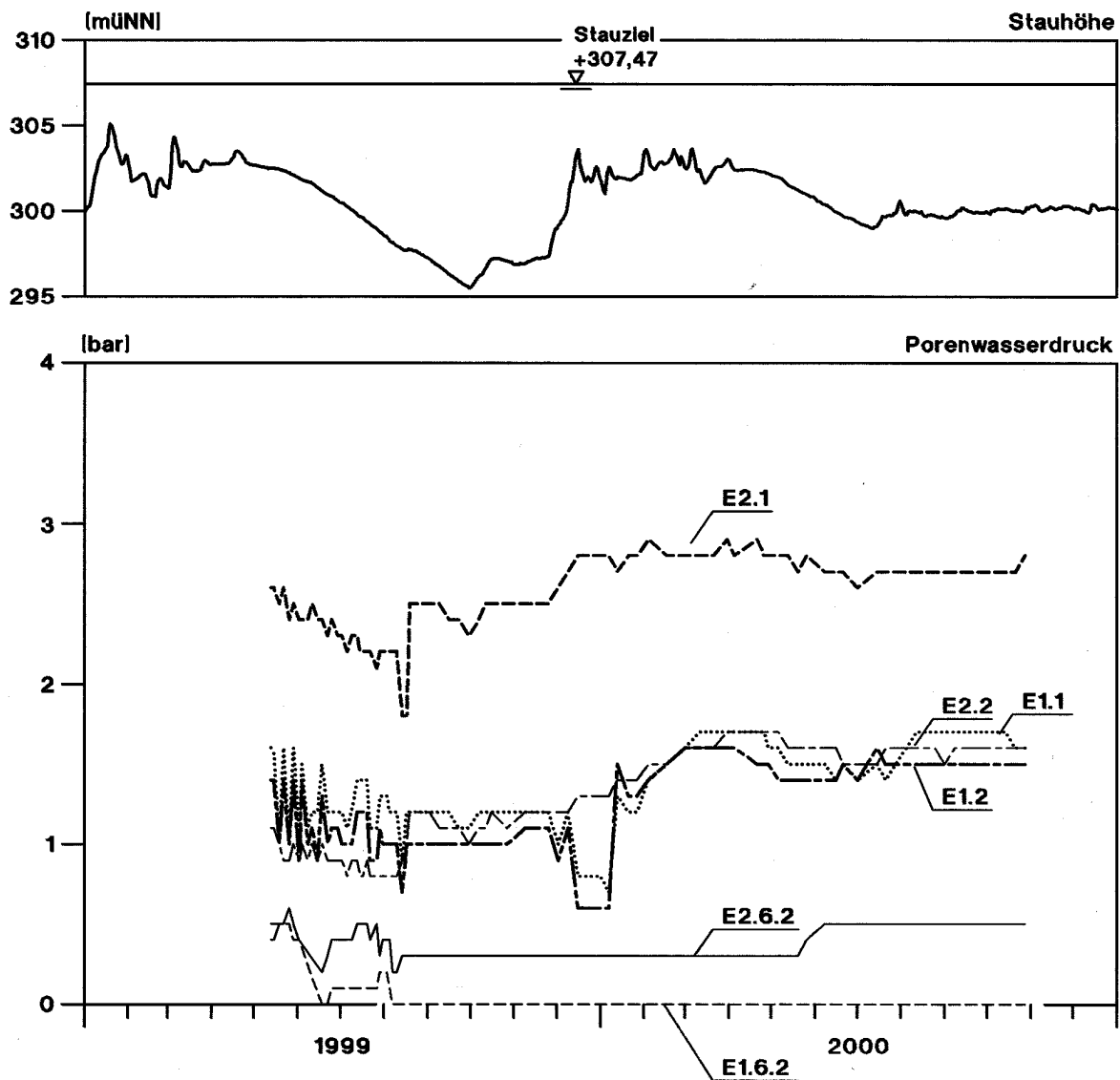


Abbildung 8: Messwerte des Porenwasserdrucks in der Ennepestaumauer

4.2. Wärmeflussmodell

Neben der Wasserlast haben die jahreszeitlichen Temperaturänderungen einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten einer Staumauer. Aus diesem Grund werden die Bauwerkstemperaturen im Inneren der Mauer gemessen. Diese Messwerte können mit Hilfe eines FEM-Modells analysiert werden [3].

Die Nachrechnung der Temperaturverhältnisse in der Fürwiggestaumauer (s. Abs. 3.3) erfolgte über einen Zeitraum von 10 Jahren 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 (s. Abbildung 9).

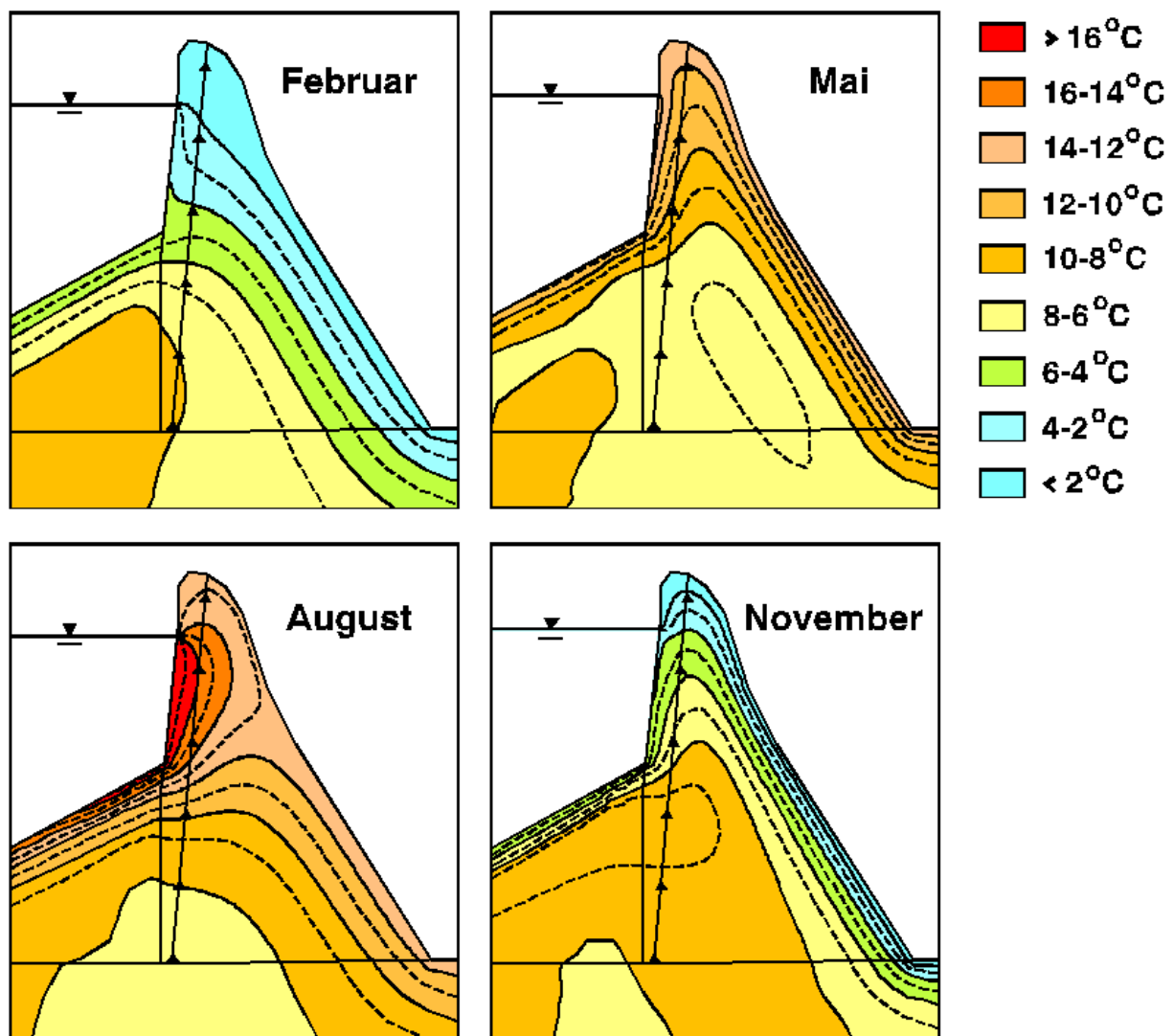


Abbildung 9: Jahreszeitliche Temperaturverteilung in der Fürwiggestaumauer

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 vorhandenen Messfühler ebenfalls im Modell abgebildet. Deren berechnete Ganglinien konnten nun mit den gemessenen Ganglinien verglichen werden.

Die an den Messpunkten errechneten Temperaturganglinien zeigen eine deutliche Übereinstimmung mit den Messwerten. Exemplarisch sind in Abbildung 10 an drei Messpunkten die Ganglinien der Rechnung und der Messung einander gegenüber gestellt.

[°C]

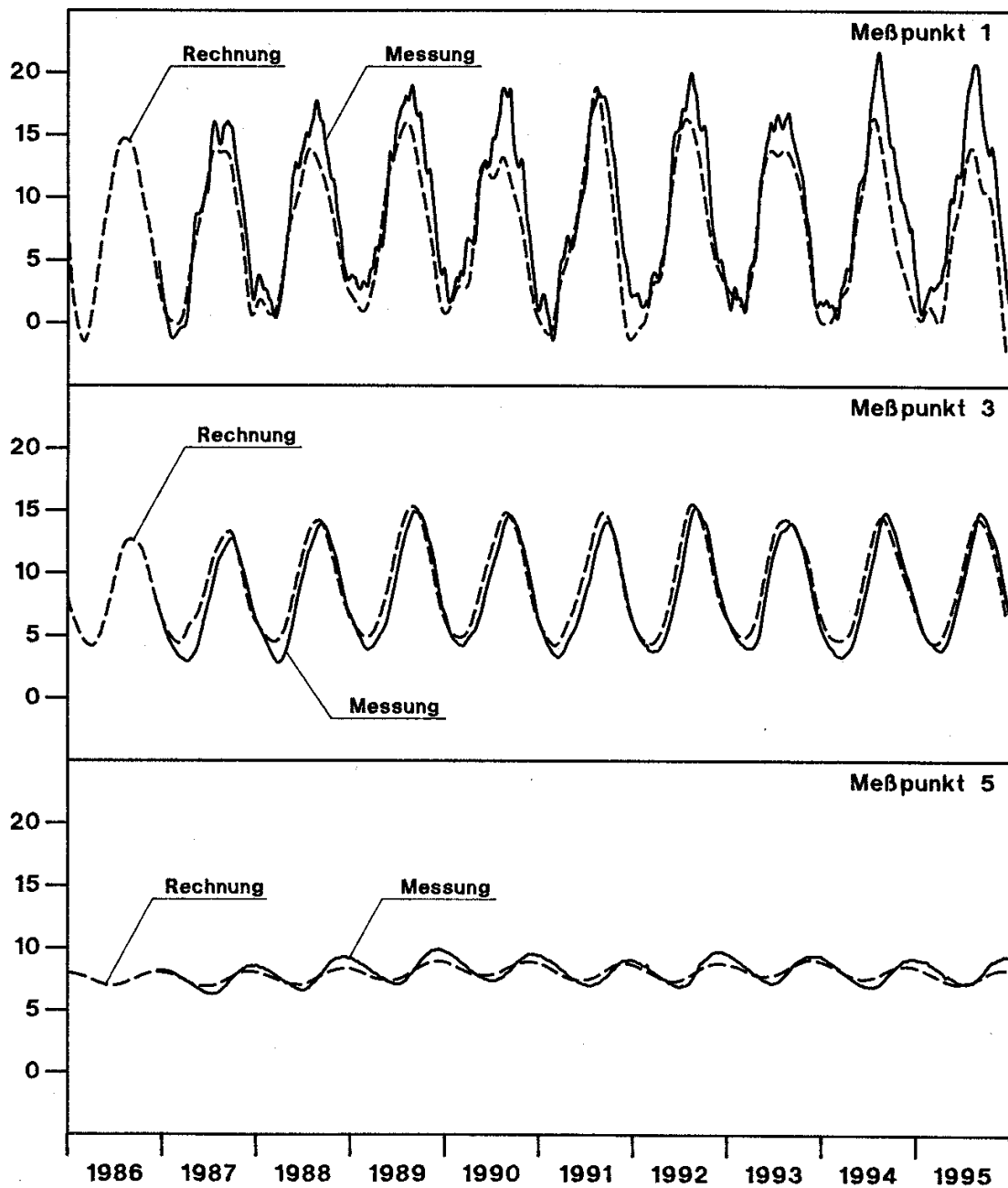


Abbildung 10: Ganglinien an drei Messpunkten

4.3. Kontinuumsmechanische Modelle

Auf der Grundlage der beiden vorgestellten Modelle ergeben sich die Belastungen für die Berechnung einer Staumauer mit Hilfe eines kontinuumsmechanischen Modells.

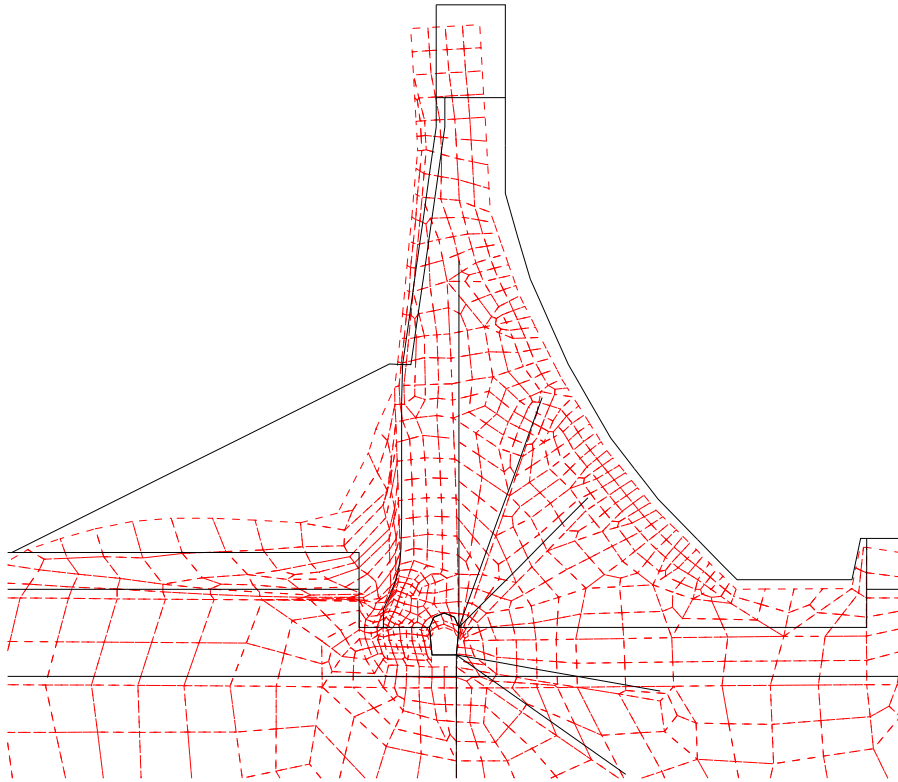


Abbildung 11: Berechnete Verschiebungen der Ennepestaumauer im Primärfall (Talsperre leer)

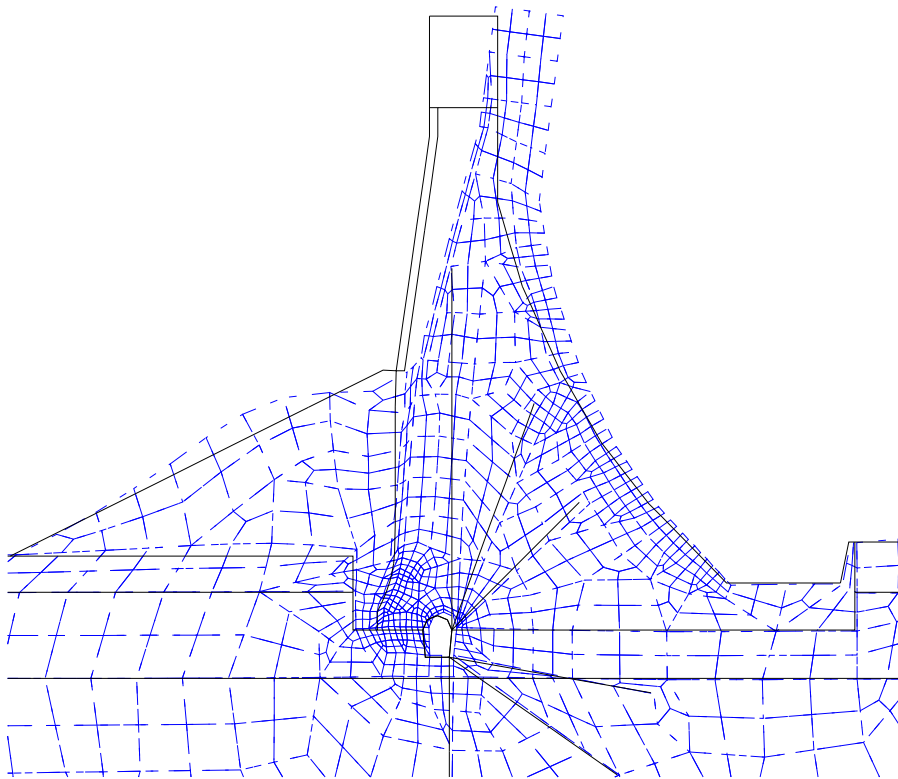


Abbildung 12: Berechnete Verschiebungen der Ennepestaumauer im Sekundärfall (Talsperre voll)

Das für geotechnische Fragestellungen entwickelte FEM-Programm GEOFIN [4] erlaubt die Untersuchung von Spannungs- und Verformungszuständen im räumlichen Kontinuum. 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 (Zugfestigkeit, Scherparameter und Mohr-Coulombsches Bruchkriterium) vorgegeben werden. Zusätzlich ist es möglich, Ebenen verminderter Festigkeit, z. B. beliebig orientierte Trennflächen (z. B. Klüfte im Felsuntergrund einer Staumauer), zu definieren.

Nach Abschluss des Berechnungsprozesses erhält man Verschiebungen für jeden Punkt der Staumauer, wie auch die Spannungen im Inneren des Mauerkörpers.

Für den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung muss zwischen Primär- und Sekundärfall unterschieden werden. Der Primärfall ist der Ausgangszustand bei Berechnungsbeginn, im vorliegenden Fall also die auf dem Untergrund stehende Mauer (ohne Wasserlast). Im Sekundärfall kommt dann noch die Beanspruchung durch das Wasser bzw. durch sonstige Wirkungen (z.B. Windlast, Eis) hinzu. Die Unterscheidung ist wesentlich, weil nur solche Verformungen mit Messungen verglichen werden können, die aufgrund der sog. sekundären Belastungsanteile (Wasser, ggf. Eis) entstanden sind und nicht den Verformungseinfluss des Eigengewichts von Mauer und Untergrund repräsentieren. Dagegen sind die im Bauwerk wirkenden Spannungen sehr wohl das Ergebnis aller Einflüsse (also z. B. des Eigengewichts, des Wassers und des Eises).

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die für die Staumauer der Ennepetalsperre (s. Abs. 4.1) berechneten Verschiebungen für den Fall einer leeren Talsperre und bei Vollstau. Die Verschiebungen im Fall der leeren Talsperre sind selbstverständlich in der Natur nicht zu beobachten, da sie bereits mit dem Bau der Staumauer aufgetreten sind und während des Baus ausgeglichen wurden. Messbar ist daher nur die im Sekundärfall durch die zusätzlichen Belastungen aus Temperaturen und Wasserdruck hervorgerufenen Verschiebungen, die im Fall der Ennepestaumauer bis zu 5 cm betragen können.

5. Vergleichende Betrachtungen

Wesentliche Hilfe bei der Beurteilung der Messergebnisse der Talsperrenüberwachung liefert der Vergleich mit den Beobachtungen an anderen, vergleichbaren Absperrbauwerken. Sind solche Informationen nicht erreichbar, so finden sich in der Fachliteratur entsprechende Hinweise. Beispielhaft soll hier das Setzungs- und Verschiebungsverhalten von Staudämmen analysiert werden.

Clements [10] gibt Vergleichswerte für Setzungen (S) und Horizontalverschiebungen (δ) an Staudämmen bezogen auf die Höhe H des Dammes an.

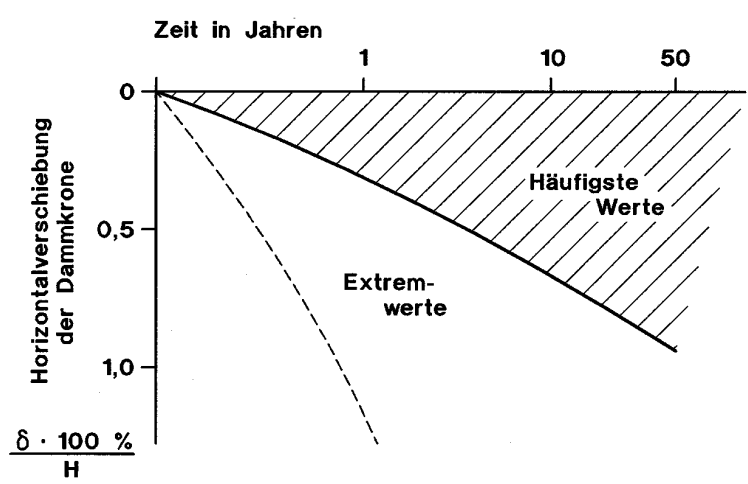
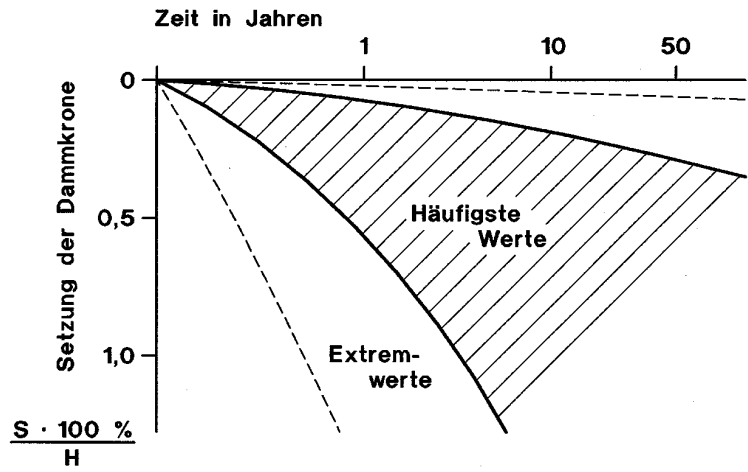


Abbildung 13: Häufigste Werte von Setzungen und Horizontalverschiebungen an Staudämmen [10]

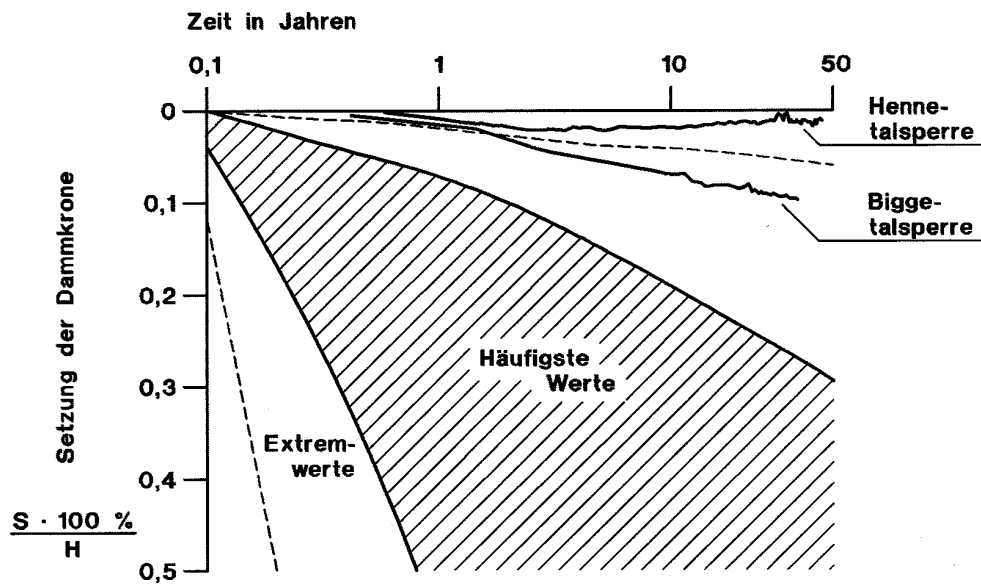


Abbildung 14: Gegenüberstellung der Setzungsmessungen am Bigge- und Hennedamm mit den "häufigsten Werten von Setzungen" nach [10]

Abbildung 14 veranschaulicht die Auswertungen für zwei Staudämme. Der 57 m hohe Steinschüttdamm der Biggetalsperre besitzt eine Oberflächendichtung. Seit dem Einstau im Jahr 1965 sind an der Dammkrone nur Setzungen von wenigen Zentimetern aufgetreten. Noch geringer sind die Setzungen seit Einstau an der Hennetal-sperre. Ihr ebenfalls oberflächengedichteter Damm wurde 1955 eingestaut. In der Gegenüberstellung mit den Erfahrungswerten nach [10] stellen sich die beobachteten Setzungen als geringfügig dar.

6. Zusammenfassung

Die Messdaten aus der Talsperrenüberwachung liefern in einer zeitnahen Auswertung Aussagen zur Sicherheit des Absperrbauwerks. Neben diesen tagesaktuellen Ergebnissen sind jedoch vertiefte Analysen der Messwerte von Bedeutung. Drei Verfahren wurden vorgestellt:

- Mathematisch-statistische Analyse
- EDV-gestützte Modelle
- Vergleichende Betrachtungen

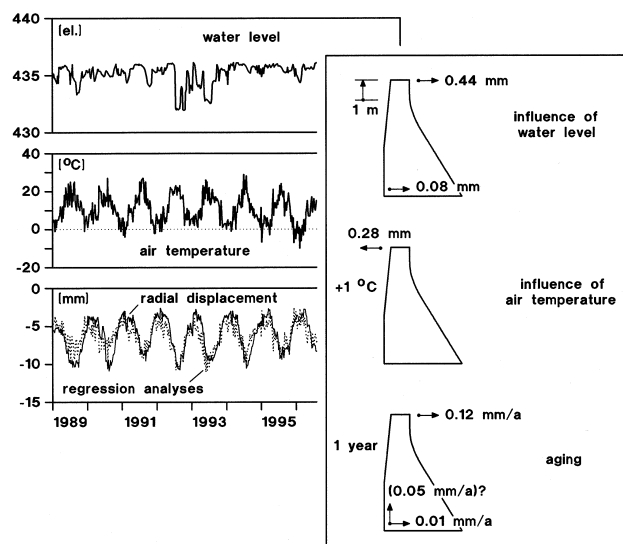


Abbildung 15: Vertiefte Analyse der Verformungsmessungen an einer Gewichtsstaumauer

Mit Hilfe dieser Methoden lassen sich langfristige Veränderungen des Bauwerks identifizieren und quantifizieren.

Die Ergebnisse können eine Grundlage bilden für die

- Planung von Sanierungen,
- Optimierung des Messprogramms sowie
- Einführung von Alarm- und Grenzwerten für die automatische Messwertüberwachung.

7. Literatur

- [1] ATV-DVWK; Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Stand-sicherheit von Staumauern und Staudämmen; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 222; 1991
- [2] ATV-DVWK; Sicherheitsbericht Talsperren - Leitfaden; DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 231; 1995
- [3] ATV-DVWK; Berechnungsverfahren für Gewichtsstaumauern - Wechsel-wirkung zwischen Bauwerk und Untergrund; DVWK-Merkblätter zur Was-serwirtschaft, Heft 242; 1996
- [4] Bettzieche, V.; Rißler, P.: LISSA/GEOFIN - Benutzerhandbuch, Ruhrver-band, Essen Dezember 1986/1993
- [5] Bettzieche, V.; Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer, Wasserwirtschaft 87 (1997);
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Bettzieche, V., Könke, C., König, C.: Discrete crack propagation in ma-sonry dam structures; in Geophysical Research Volume 3, 2001; 26th General Assembly European Geophysical Society; Nice; March 2001
- [9] Bettzieche, V., Heitefuss, C.: Monitoring as a basis of cost-effective reha-bilitation of an old masonry dam; in: Dams in a European Context, Euro-pean ICOLD Symposium, Norway, Swets & Zeitlinger, Lisse, June 2001
- [10] Clements, R.P.: Post-Construction deformation of rockfill-dams, in: Journ. of Geotechn. Eng., proc. ASCE, New York 113, 1984, GTI, pp.46 bis 59
- [11] Kreyszig, Erwin; Statistische Methoden und ihre Anwendungen; Verlag Vandenhoeck und Ruprecht; Göttingen 1979
- [12] Schlittgen, Rainer; Zeitreihenanalyse; Oldenbourg-Verlag; München; 1995

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