

Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 6 (1970)

Artikel: Ergebnis von Dehnungs- und Temperaturmessungen in der Stauwand des Krafthauses eines Pumpspeicherwerkes

Autor: Meyer, Hans-Gerd

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-7762>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ergebnis von Dehnungs- und Temperaturmessungen in der Stauwand des Krafthauses eines Pumpspeicherwerks

Strain and Temperature Measurements on the Dam Wall of a Powerhouse
of a Pump Storage Station

Résultats des mesures de dilatation et de température dans le mur de
retenue d'une usine hydro-électrique par pompage

HANS-GERD MEYER

Dr. Ing.
Deutschland

1. Allgemeines

Das Krafthaus am unteren Becken des Pumpspeicherwerkes ist im Querschnitt als geschlossener Stahlbetonrahmen ausgebildet. Eine vertikale Seite des Rahmens ist die etwa 116 m lange, etwa 20 m hohe und etwa 2,50 m dicke Stahlbetonstauwand. (s. Bild 1)

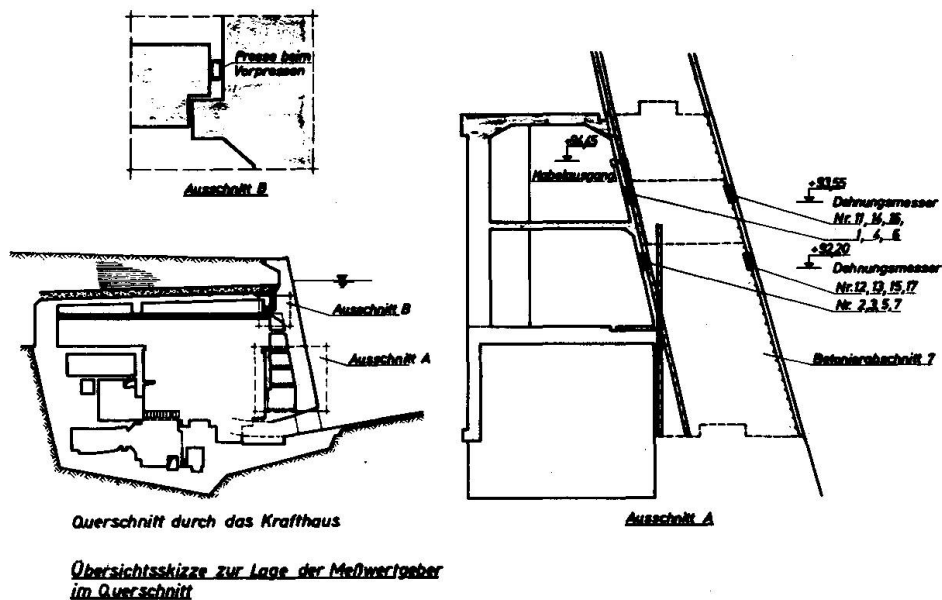


Bild 1:

In Längsrichtung war das Krafthaus in 4 Blocks - entsprechend den 4 Generatoren bzw. Pumpensätzen - durch Dehnungsfugen unterteilt. Alle Baumaßnahmen erfolgten blockweise.

Um auf der Unterwasserseite der Stauwand zur Sicherung gegen Risse auf alle Fälle einen Druckspannungszustand zu erreichen, wurde die Stauwand in Höhe der Krafthausdecke – nach Fertigstellung des Krafthauses bevor das Unterbecken mit Wasser gefüllt wurde – in Richtung Unterwasser vorgepreßt. Das Vorpresen erfolgte mit ölhydraulischen Pressen, die in einem dafür vorgesehenen Pressenspalt zwischen Stauwand und der auf einer Auskragung der Stauwand aufliegenden Krafthausdecke angesetzt wurden.

Zur Kontrolle der beim Vorpresen in der Bewehrung der Stauwand auftretenden Spannungen, aber auch, um einen Gesamtüberblick über die Spannungen der Stauwand zu erhalten, sollten die Dehnungen in der Hauptbewehrung der Stauwand gemessen werden. Die Messungen wurden vom Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der Technischen Universität Hannover vom Verfasser durchgeführt.

2. Durchführung der Messungen

Für die Dehnungsmessungen wurde vom Prüfinstitut ein auf Dehnungsmeßstreifenbasis arbeitender temperaturkompensierter Dehnungsgeber entwickelt, der spannschloßartig in die Bewehrung (\varnothing 22 mm, St III a) eingeschraubt werden konnte. Die Temperaturmessung erfolgte mit gesondert hergestellten elektrischen Widerstandsthermometern. Die Meßinstrumente wurden während der normalen Betonierarbeiten an der Stauwand mit einbetoniert. Die Meßstellen wurden sowohl auf der Unterwasserseite, als auch auf der Oberwasserseite jeweils in 2 verschiedenen Höhenlagen angeordnet. Insgesamt waren – verteilt auf die 4 Blocks des Krafthauses – 56 Meßstellen vorhanden. Eine Übersicht über die Lage der Meßstellen geben Bild 1 und Bild 2.

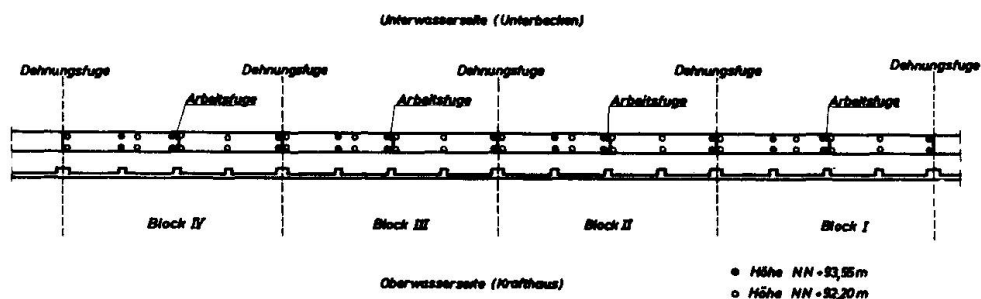


Bild 2:

Übersichtsskizze zur Lage der Meßwertgeber im Grundriß

Alle Meßstellen wurden in unregelmäßigen Abständen, je nach Baufortschritt, einzeln durchgemessen. Als Null-Messung wurde die Messung unmittelbar vor dem Betonieren genommen. Die Messungen wurden dann über einen Zeitraum von etwa 3 Jahren weitergeführt. Die Meßgeräte sind z. Zt. noch voll einsatzfähig, so daß jederzeit weitere Messungen vorgenommen werden könnten, die zweifellos interessant wären.

3. Auswertung der Messungen

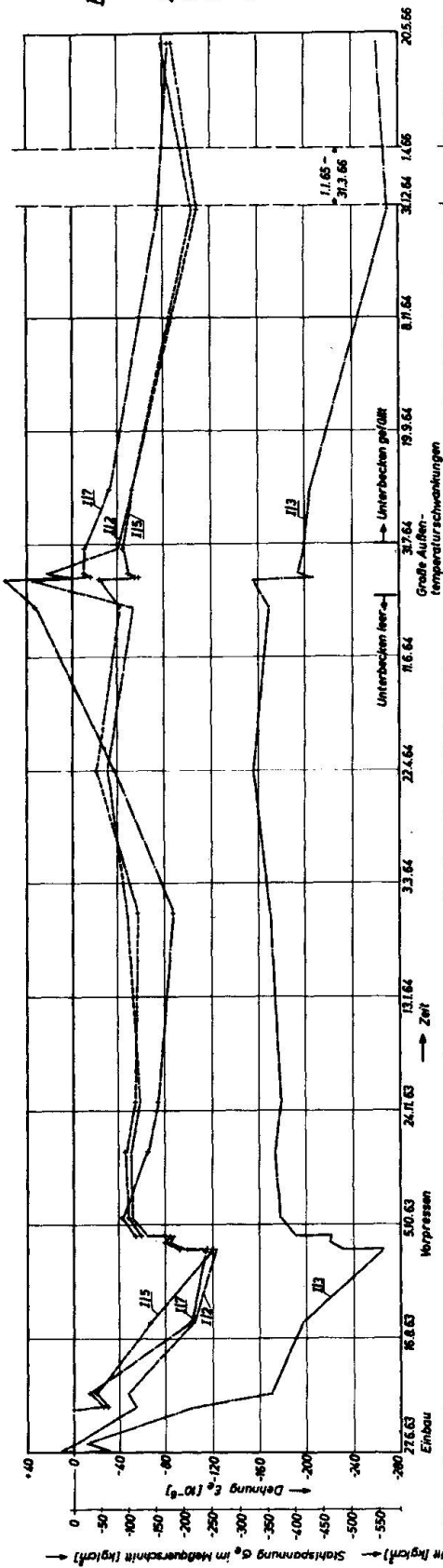
3.1. Dehnungsverlauf

Wie nicht anders zu erwarten, ergaben die Einzelmessungen auch an den an und für sich korrespondierenden Meßstellen teil-

Bild 3 a

Zeitlicher Verlauf der
Stahldehnungen und
Stahlspannungen
Block I (Oberwasserseite)

a) H=92,20 m ü. NN



b) H=93,55 m ü. NN

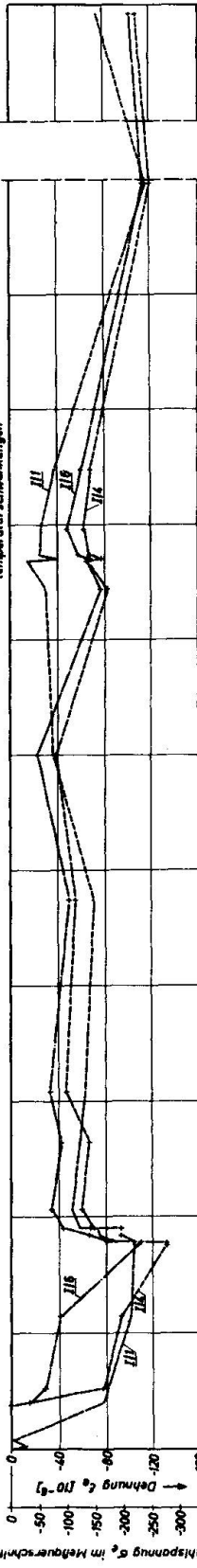
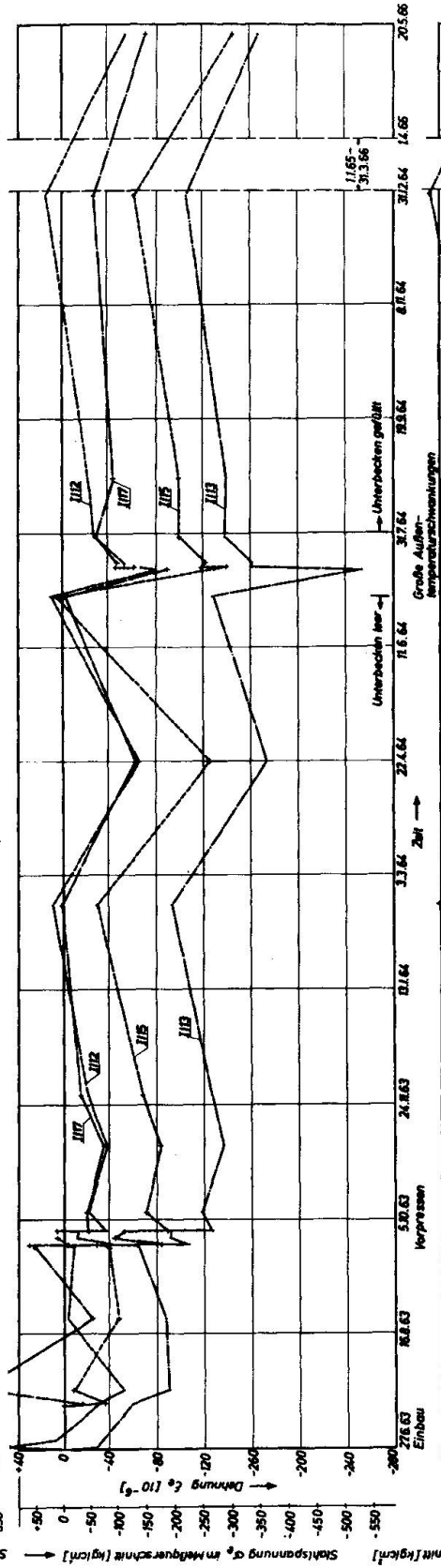


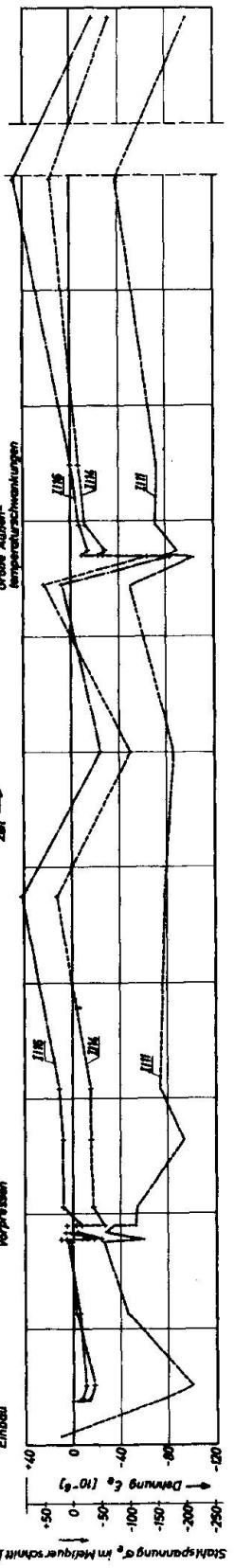
Bild 3 b

Zeitlicher Verlauf der
Stahldehnungen und
Stahlspannungen
Block I (Unterwasserseite)

a) H=92,20 m ü. NN



b) H=93,55 m ü. NN

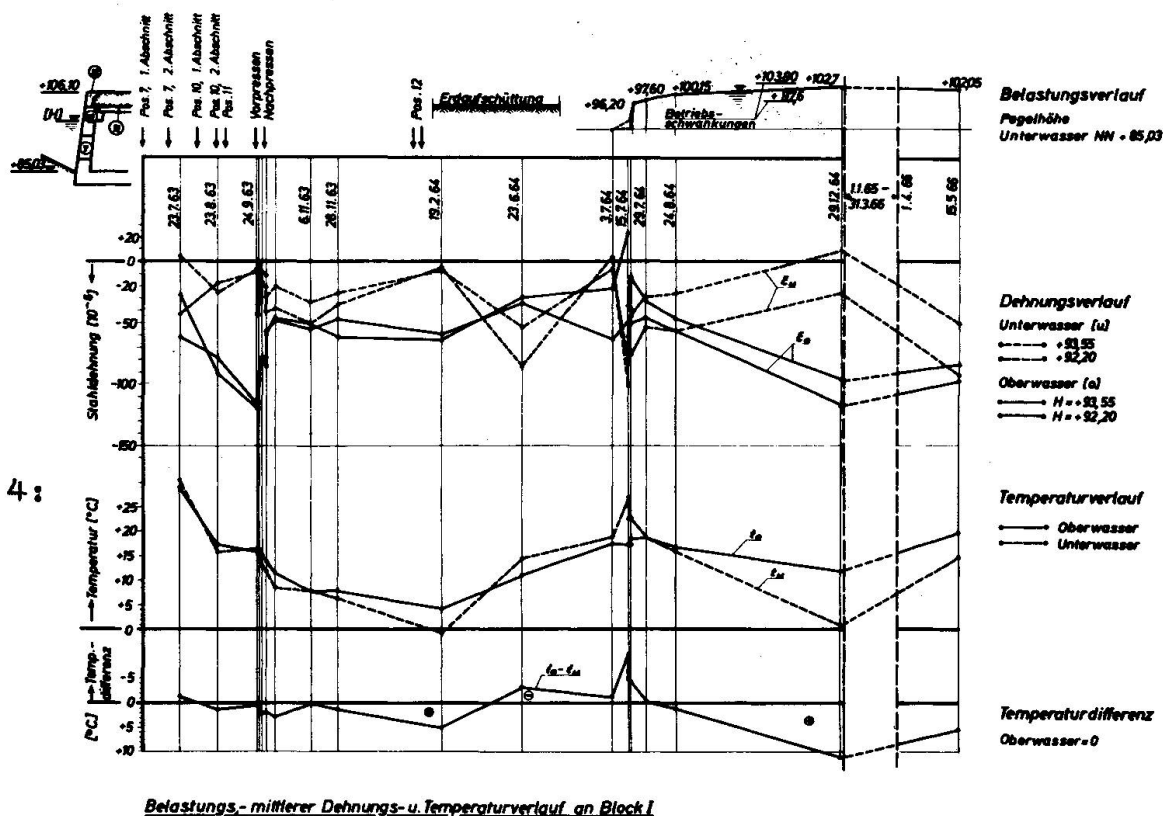


weise erhebliche Unterschiede, die eine Auswertung der Meßergebnisse im einzelnen kaum zuließen. (s. Bild 3 a und 3 b)

Um die hauptsächlichen Tendenzen des Spannungszustandes aber trotzdem erkennen zu können, wurden die Dehnungen und Temperaturen der auf gleicher Höhe liegenden Meßgeber, getrennt nach Ober- und Unterwasserseite, jeweils für einen Bauwerksblock gemittelt. Ein solcher gemittelter Verlauf der Dehnungen und Temperaturen wurde in Abhängigkeit von der Zeit für einen Bauwerksblock in Bild 4 dargestellt. Es sollte versucht werden, aus diesem Dehnungsverlauf den Einfluß bestimmter Bau- oder Belastungszustände auf den Gesamtdehnungsverlauf zu eliminieren. Diese Auswertung wurde erschwert, weil die einflußnehmenden Faktoren wie Eigengewicht, Vorpresse, Schwinden, Kriechen und Temperaturänderungen und auch der Wasserdruck größtenteils gleichzeitig auftraten. Die daraus herrührenden Dehnungen sind somit überlagert. Die quantitative Abschätzung des Einflusses der einzelnen Beanspruchungsarten wurde aber durch zeitlich begrenzte Messungen bei definierten Beanspruchungszuständen, so z.B. bei leerem Becken und größeren Temperaturunterschieden oder bei konstanter Temperatur und Betriebsschwankungen des Wasserspiegels trotzdem ermöglicht.

Die Beanspruchung der Stauwand wurde als Dehnung der Bewehrung gemessen. Da nach den Meßergebnissen die Stauwand in ungerissenem Zustand (Zustand I) verblieb, kann die Stahldehnung auch gleich der Betondehnung gesetzt werden. Für überschlägliche Spannungsermittlungen wurde der E-Modul des Stauwandbetons an gesondert hergestellten Probekörpern im Mittel zu $E_b = 2,1 \times 10^5 \text{ kp/cm}^2$ ermittelt, der E-Modul des Betonstahls kann zu $E_s = 2,1 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2$ angenommen werden.

Bild 4:



Der geringe für diesen Beitrag zur Verfügung stehende Platz reicht nicht aus, um auf alle interessanten Einzelheiten der Meßergebnisse einzugehen. Im Rahmen des Themas dieses Symposiums soll daher hier nur der Größenanteil der Beanspruchung der Stauwand infolge Temperaturänderung den anderen maßgebenden Beanspruchungen wie Eigengewicht, Vorpresen, Wasserdruckbelastung insgesamt und Einfluß der Spiegelschwankungen während des Betriebes gegenüber gestellt werden. Vorweg sei noch gesagt, daß der Einfluß des Schwindens und Kriechens nicht exakt eliminiert werden konnte.

3.2. Dehnungen infolge Eigengewicht und Vorpresen der Stauwand.

Als erster definierter Belastungszustand kann der Zustand der Stauwand vor dem Vorpresen angesehen werden. Obwohl der Zustand bei den einzelnen Blocks zu verschiedenen Zeitpunkten und verschiedenen Außentemperaturen (aber Innentemperatur = Außentemperatur) auftrat, so sind doch die Dehnungen zu diesem Belastungszeitpunkt erstaunlich gleich. (s. Tabelle 1) Der Belastungszustand sei hier kurz "Eigengewicht" genannt, obwohl Schwindeinflüsse usw. auch darin enthalten sein können.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Dehnungen vor und nach dem Vorpresen

Belastungszustand	Stahl-Dehnungen (10^{-6})			
	NN + 93,55 m		NN + 92,20 m	
	Oberwasser	Unterwass.	Oberwass.	Unterwass.
Vor dem Vorpresen				
Block I	- 115	0	- 119	0
" II	- 108	- 7	- 138	+ 6
" III	- 77	+ 8	- 107	+ 16
" IV	- 85	+15	- 145	+ 37
i. Mittel	- 92	+ 4	- 127	+ 15
Nach dem Vorpresen				
im Mittel	- 50	-30	- 77	- 41

Vor dem Vorpresen waren demnach auf der Unterwasserseite geringe Zugspannungen in der Bewehrung, während auf der Oberwasserseite Druckspannungen herrschten. Die beim Vorpresen der Wand gemessenen mittleren Dehnungen sind in Abhängigkeit von der Vorpreß-

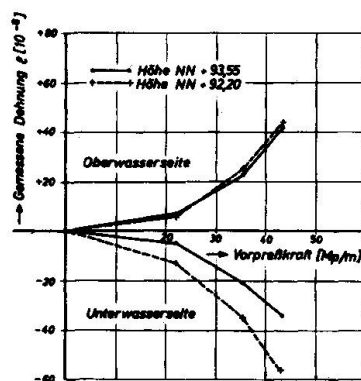


Bild 5:

Dehnungen in Abhängigkeit von der Vorpreßkraft (bezogen auf den Beginn des Vorpresens)

kraft in Bild 5 aufgetragen. Die Dehnungen wurden dabei auf den Zeitpunkt vor dem Vorpresen (Vorpreskraft = 0) bezogen. Der nichtlineare Zusammenhang zwischen Dehnung und Vorpreskraft muß auf Reibungsverluste der Vorpreskraft zurückgeführt werden. Die Vorpresung ergab auf der Unterwasserseite eine Stauchung (Druckspannung), auf der Oberwasserseite eine Dehnung. Damit wurde – wie geplant – auf der Unterwasserseite die Zugspannung aus Eigengewicht usw. überdrückt (s. Tabelle 1)

Durch das Vorpresen der Wand wird ein Biegespannungszustand erzeugt mit Dehnungen von etwa $+40 \times 10^{-6}$ an der Meßstelle NN + 93,55 m bzw. etwa $+60 \times 10^{-6}$ an der Meßstelle NN + 92,20 m; d.h. der Gesamtdehnungsunterschied allein in Folge des Vorpresens ist $\Delta \epsilon = 76 \times 10^{-6}$ bei Meßstelle 93,55 m und 138×10^{-6} bei Meßstelle 92,20 m. Das Vorpresen ergab demnach Dehnungsunterschiede in gleicher Größe wie die sonstigen Dehnungen aus "Eigengewicht usw."

3.3. Dehnungen infolge von Temperaturunterschieden.

Bei Betrachtung der Mittelwertkurven für die Dehnungen fallen erhebliche Veränderungen der Dehnungen auf, obwohl sich in bestimmten Zeiträumen die äußere Belastung nicht geändert hat und ein Einfluß von Schwinden und Kriechen wegen der Kürze der Zeitintervalle (z.B. 15. und 16.7.1964) nicht in Betracht kommt. Bei der weiteren Auswertung konnten diese Dehnungsänderungen auf Temperatureinwirkung zurückgeführt werden.

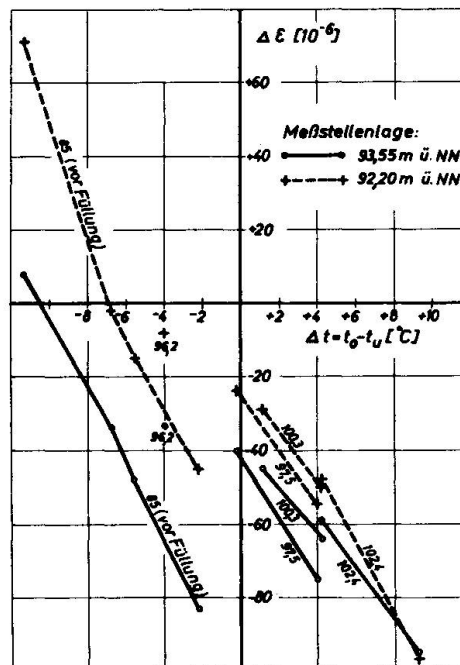


Bild 6:

Dehnungsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasserseite in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz

(Parameter: Füllhöhe des Unterbeckens)

Die absoluten Temperaturen zeigen dabei keinen signifikanten Einfluß auf die Dehnungsänderung, wohl aber der Betrag des Temperaturunterschiedes $\Delta t = t_o - t_u$ zwischen Ober- und Unterwasserseite. In Bild 6 sind die Dehnungsdifferenzen zwischen Ober- und Unterwasserseite ($\Delta \varepsilon = \varepsilon_o - \varepsilon_u$) für verschiedene Meßzeitpunkte zwischen 1964 und 1966 in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied aufgetragen worden. Als Parameter geht in die Darstellung die Füllhöhe des Unterbeckens ein, da die Messungen sowohl bei leerem als auch bei unterschiedlich gefülltem Unterbecken durchgeführt wurden. Die Verbindung der Punkte mit gleichem Parameter (Füllhöhe) ergibt für jede Meßhöhe eine Schar von Geraden mit gleicher Steigung; die Geraden für die zwei Meßhöhen unterscheiden sich lediglich durch einen konstanten additiven Wert, der den Ausgangszustand der Wand ohne "Temperaturbeanspruchung" darstellt.

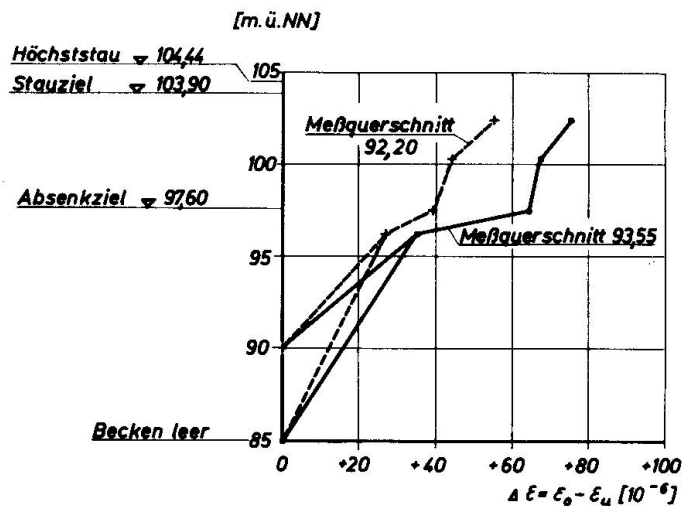
Bemerkenswert ist die Größenordnung der Dehnungsunterschiede. Zwischen einer Messung im Sommer, bei der die Temperatur unter Voraussetzung eines gefüllten Beckens an Ober- und Unterwasserseite etwa gleich ist ($\Delta t = 0$) und einer Messung im Winter ($\Delta t = 10^\circ$) kann ein Dehnungsunterschied von $\Delta \varepsilon = 80 \times 10^{-6}$ auftreten. Dieser Dehnungsunterschied ist genauso groß wie der durch das Vorpressen der Wand erreichte.

Die mittlere Steigung der Geraden in Bild 6 beträgt etwa $\alpha = 10 \times 10^{-6} / \text{grd } ^\circ\text{C}$ Temperaturunterschied, sie ist von gleicher Größe wie die Wärmeausdehnungszahl von Beton ($\alpha_t = 10 \times 10^{-6} / \text{grd}$) der aus Temperaturunterschieden zu erwartende Beton- bzw. Stahlspannungsunterschied der Stauwand kann demnach auf Grund der Meßergebnisse genügend genau nach dem Ansatz $\Delta \sigma = \alpha_t \times E \times \Delta t$ vorausberechnet werden. (Es sei hier ausdrücklich hervorgehoben, daß es sich hier um spannungserzeugende Dehnungsunterschiede handelt, da die spannungslose Temperaturverformung durch die Konstruktion der Meßgeber eliminiert wurden).

3.4. Dehnung infolge der Stauhöhe des Unterbeckens.

Als eine wichtige Einflußgröße auf die Beanspruchung der Stauwand muß die Stauhöhe des Wassers im Unterbecken angesehen werden. Der Einfluß der gesamten Stauhöhe, d.h. von der Füllung des Vorbodens des Beckens an, läßt sich aus den Meßwerten Bild 4 nicht direkt auswerten, da in ihnen gleichzeitig der Parameter "Temperaturunterschied" (vgl. Abschn. 3.3) enthalten ist. Aus Bild 6 kann jedoch der Einfluß der Stauhöhe ermittelt werden, wenn die Geradenscharen auf dem Wert $\Delta t = 0$ extrapoliert werden. Die auf der Ordinate für $\Delta t = 0$ abgelesenen Werte stellen die von der Temperaturdifferenz unabhängigen Dehnungsunterschiede (einschl. etwaiger Schwind- und Kriechdehnungen) dar; sie sind in Bild 7 dargestellt. Als Bezugszeitpunkt wurde der Zeitpunkt der Füllung des Vorbodens gewählt. *)

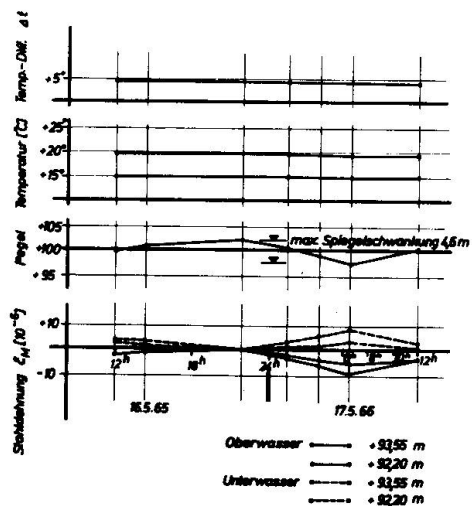
*) Infolge eines ungenauen Protokolls konnte die genaue Füllhöhe des Vorbodens nicht ermittelt werden, sie dürfte aber zwischen NN + 85 m (Vorboden leer) und NN + 90 m gelegen haben.



Differenz der Dehnungen auf Ober- und Unterwasserseite in Abhängigkeit von der Stauhöhe bezogen auf die Messungen am 15./16.7.1964 (Beginn des Füllens)

(auf eine Temperaturdifferenz $\Delta t = 0$ zwischen Ober- und Unterwasser extrapoliert)

Bild 7:



Dehnungsänderung in Abhängigkeit von der Wasserspiegelschwankung innerhalb von 24 Std.

Bild 8:

Der maximale Dehnungsunterschied von 60 bzw. 80×10^{-6} infolge der Füllung des Staubeckens ist nach dieser Auswertung gleich oder kleiner als der o.a. Dehnungsunterschied infolge Temperaturunterschied von 10°C .

Die in Bild 7 dargestellten Dehnungsunterschiede treten nur bei dem erstmaligen und einmaligen Füllen des Unterbeckens von $\text{NN} + 85 \text{ m}$ auf etwa $\text{NN} + 104 \text{ m}$ auf. Die täglichen Stauhöhenschwankungen infolge des Betriebs des Pumpspeicherwerks betragen dagegen nur maximal etwa 6 m . Der Einfluß dieser Stauhöhenänderung (Betriebsschwankung) wurde bei einer durchlaufenden Messung über 24 Stunden festgestellt, deren Ergebnis in Bild 8 dargestellt ist.

Da der Temperaturunterschied während der Messung konstant blieb, können die Messungen direkt der Wasserspiegelschwankung zugeordnet werden. Bei einer vorhandenen Spiegelschwankung von $4,6 \text{ m}$ ergaben sich maximale Änderungen des Dehnungsunterschiedes zwischen Ober- und Unterwasser von $\Delta \epsilon = 18 \times 10^{-6}$ bzw. 9×10^{-6} , je nach Meßhöhe. Bei maximal geplanter Spiegelschwankung von $6,3 \text{ m}$ sind dann Dehnungsunterschiede von $\Delta \epsilon = 25 \times 10^{-6}$ bzw. 12×10^{-6} zu erwarten. Gegenüber den infolge des Temperaturunterschiedes entstandenen Dehnungsunterschieden sind die infolge des Betriebs des Pumpspeicherwerks entstehenden Dehnungsunterschiede demnach um mehr als $2/3$ kleiner.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorstehenden wurde versucht, aus an einer Stauwand über einen längeren Zeitraum durchgeführten Dehnungsmessungen die auf den Dehnungszustand einflussnehmenden einzelnen Beanspruchungszustände ihrer Grösse nach zu ermitteln. In Bezug auf die Themenstellung dieses Symposiums ergab sich, dass der Temperaturunterschied zwischen Ober- und Unterwasserseite der Stauwand gleiche oder grössere Dehnungsunterschiede (Spannungsunterschiede) hervorrief als die Beanspruchungszustände Eigengewicht, Vorpressen der Stauwand und Wasserdruck.

SUMMARY

Strain and temperature measurements were carried out over a considerable period of time on a dam wall. The results were used to determine the relative importance of the various factors affecting the state of strain.

Temperature differences between the upstream and downstream sides of the wall were found to produce differences in strain and stress which were as great as, and sometimes greater than those produced by hydrostatic pressure and the thrust forces.

RESUME

Dans ce qui précède, on a cherché l'ordre de grandeur de chaque cas de sollicitation, influant sur l'état de dilatation, à partir de mesures de dilatation faites sur un mur de retenue pendant une assez longue période.

En ce qui concerne le thème de ce symposium, on a trouvé que la différence de température entre les côtés amont et aval du mur suscitait des différences de dilatation (de contraintes) égales ou supérieures à celles dues au poids propre, à la précontrainte du mur et à la pression de l'eau.