

Н е ф е д о в а, Г.Н., К о т е н к о в, Ю.К.

(Ingenieure, wissenschaftliches Forschungsinstitut "Hydro-
projekt"¹⁾)

BAUSTELLENUNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS STATISCHE VERHALTEN
EINER LAMELLE DER KAMMER EINER SCHIFFFAHRTSSCHLEUSE

Trudy GIDROPROEKTA. Sbornik Tridcat' vtoroj: Plotiny iz
mestnych materialov. Moskva: 32 (1973), S. 183-193.

Russ.: | НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
| СТАТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ТИПОВОЙ СЕКЦИИ КАМЕРЫ
| СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА

Naturnye issledovanija Statičeskoj raboty tipovoj
sekcii kamery sudochodnogo šljuza.

In diesem Artikel werden die Ergebnisse der Baustellenuntersuchungen über das statische Verhalten einer Meßlamelle der Kammer einer einstufigen Zwillingschleuse während des Baus und in den ersten vier Betriebsjahren (1967-1971) aufgezählt. Die erzielten Ergebnisse werden ausgewertet; die gemessenen Drücke und Spannungen werden mit den nach den tatsächlichen Belastungen errechneten verglichen.

Mit Hilfe geodätischer Apparatur und Fernmeßgeräten wurden der Erddruck auf die Wände und die Erddruckreaktion auf die Kammersohle, die Spannungen in der Bewehrung, die Temperatur und die Betonverformungen wie auch die Verformungen der Wände gemessen. Der gemessene Erddruck der Hinterfüllung auf die Wand betrug 77 - 94 % des errechneten, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Belastungen. Die Erddruckreaktion auf die Schleusensohle betrug rund 109 % des errechneten Wertes. Die Spannungen in der rückseitigen Bewehrung, welche in der unteren Blockfuge der Wände gemessen wurden, betrugen 77 - 127 % der errechneten. Die Beobachtungen bestätigen das im gesamten befriedigende Verhalten der untersuchten Schleusenkammer.

5 Illustrationen; keine bibl. Angaben.

1) Научно-исследовательский Институт "ГИДРОПРОЕКТ"
имени С.Я. Жук

(183)

Baustellenuntersuchungen über das statische Verhalten von Schleusenkammern, wie sie an den Anlagen des Lenin- und des XXII. KPdSU-Kongreß-Wasserkraftwerkes an der Wolga, des Wotkiner Wasserkraftwerkes und an anderen durchgeführt wurden, lassen uns über eine große Menge tatsächlicher Angaben über ihren Spannungs- und Verformungszustand verfügen und geben uns die Möglichkeit, einige Besonderheiten in der Funktionsweise von Schleusenkonstruktionen aufzuzeigen. Die wichtigsten davon sind: der Unterschied in Größe und Form zwischen den gemessenen Druckfiguren und den nach Coulomb errechneten; der Einfluß der Kammerverformungen auf die Größe des Erddrucks und der Spannungen in der Bewehrung; der Einfluß des Verhaltens der Nachbarkammern aufeinander bei Schleusungen; die Zunahme des Seitenerddrucks, wie auch der Spannungen und Verformungen in der Bewehrung während der ersten Betriebsjahre u.a.

Die gewonnenen Daten wurden bei der Planung und Berechnung von Schleusen berücksichtigt. Gegenwärtig kann man jedoch noch nicht behaupten, daß die Kammern von Schleusen ausreichend untersucht worden wären. So wurde z.B. bei der Verallgemeinerung und Auswertung der erzielten Ergebnisse festgestellt, daß die Angaben über die Verformungen der untersuchten Bauwerke unzureichend sind, was die Durchführung einer umfassenden Erörterung der Untersuchungsergebnisse über das statische Verhalten der Kammer erschwerte wie auch, ausreichend abgeschlossene Schlußfolgerungen zu ziehen, und Empfehlungen für die weitere Planung und den Betrieb analoger Bauwerke zu geben. Eine einheitliche und genaue Methode zur Berechnung von Schleusen ist bis heute noch nicht erarbeitet worden. Damit hängt zusammen, daß die Zusammensetzung der Beobachtungen über die Verformungen der Kammer und die Menge der eingesetzten Geräte dafür erweitert wurden, verglichen mit den früher untersuchten Schleusen.

(184)

Es wurde eine einstufige Zwillingschleuse untersucht. Die Kammern sind eine Dockkonstruktion mit durchgehender Sohle von 3,5 m Stärke und Stahlbetonwände, die aus einem Stück sind und eine geneigte rückseitige Kante haben.

Die Dicke der Wände betrug unten 4,2 m und oben 1 m. Der Länge nach war jede Kammer durch Dehnungs- und Setzfugen in 10 Lamellen je 29 m aufgeteilt. Die Wände und die Kammersohle waren durch Stahlgerippe (Stahl Marke St 5 mit periodischem Profil) bewehrt. Die Sohle und die Wände waren durch Arbeitsfugen in Betonierungsblöcke aufgeteilt: die ersten in zwei Blöcke durch eine Fuge, die annähernd durch die Achse der Kammer verlief; die zweiten in zwei Stufen pro Höhe. Zum Betonieren der Schleuse wurde Beton der Güte 200 und 300 verwendet.

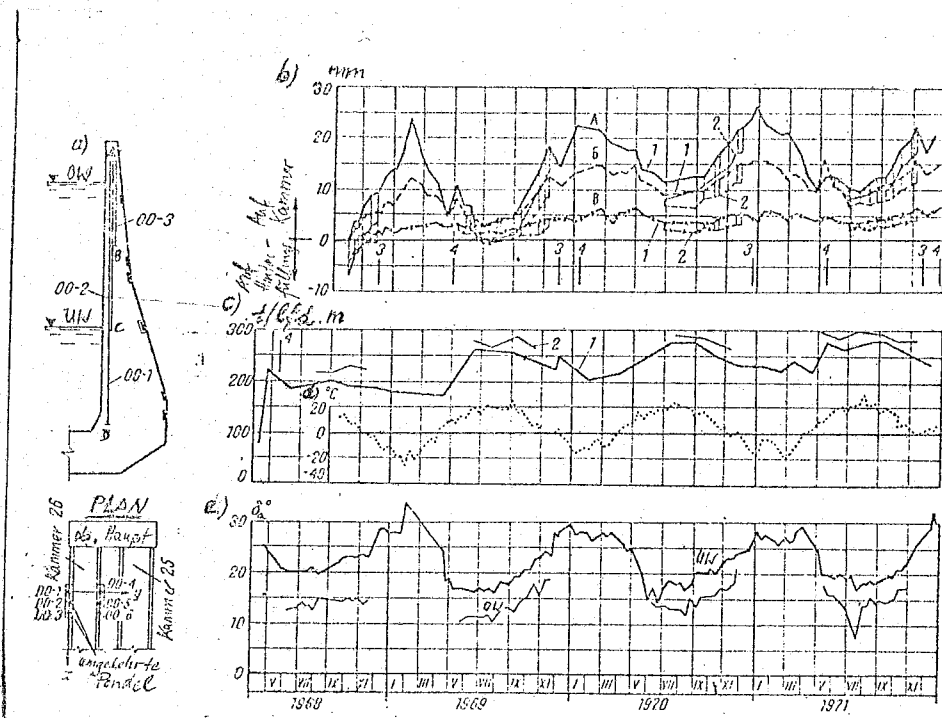
Im Fundament der Schleuse lagert Sand von feiner und mittlerer Körnung mit einer Dicke von ungefähr 8 m. Weiter unten befindet sich älterer Lehm und Ton, die zusammen etwa 12 m dick sind und von Kiessand mittlerer Körnung der Basaltschicht unterlagert werden. Die Schleuse wurde mit Sand hinterfüllt. Der Boden zwischen den Schleusen wurde im Spülverfahren durchgeführt, die Hinterfüllung und Verdichtung der äußerer Wände erfolgte im Trockeneinbauverfahren mit Planierdraht und Walzen. Mit den Hauptbauarbeiten bei der Schleuse wurde Mitte 1964 begonnen, das Betonieren der Wände erfolgte im Herbst 1967. Im April 1968 war die Schleuse betriebsbereit.

Die Baustellenuntersuchungen über das statische Verhalten der Schleusenkammer werden an einer Musterlamelle durchgeführt und hatten zum Ziel, den Zustand der Anlage während der Errichtung und des Betriebs zu kontrollieren und Angaben zu gewinnen, mit denen die während der Planung gefällten Entscheidungen bewertet werden können. In die Schleusenkammer wurden Erddruckmeßgeräte (EMG) eingebaut, welche vom wissenschaftlichen Forschungsinstitut "Hydroprojekt" hergestellt worden waren. Von den 373 EMG wurden 283 in die Kammerwände und 90 in die Sohle eingebaut. Außerdem wurden in den Wänden noch sechs umgekehrte Pendel, je 3 pro Wand eingebaut, mit denen die Bewegung der Wand in 3 Höhenpunkten gemessen wurde (Abb. 1 A, B, C). Zum erstenmal wurden derartige Messungen vom wissenschaftlichen Forschungsinstitut "Hydroprojekt" in seiner Praxis der Baustellenuntersuchungen an Schleusen durchgeführt.



In diesem Artikel werden die Ergebnisse der Beobachtungen während des Baus (vom Zeitpunkt der Errichtung der Mauern an) und während der ersten vier Betriebsjahre der Schleuse (1967-1971) erörtert.

Mit Hilfe der Fernmeßapparatur wurde der Erddruck auf die Wände und die Erddruckreaktion auf die Kammersohle, die Spannungen in der Bewehrung, die Temperaturen und die Verformung des Betons gemessen.

Der Erd- und der Grundwasser-Druck wurden mit Bodendynamometern (BD), die je 3 in 13 Höhenpunkten der Wände und in 25 Punkten der Gründungssohle montiert waren, und mit Tangentialvorrichtungen (TV), welche in den Wänden in zwei Punkten angebracht waren, gemessen. Mit den TV wurde der Abweichungswinkel des Erddrucks von der Normale zur Wand bestimmt. Der Druck des Grundwassers auf die Wände und die Schleusensohle und der Sickerdruck in den Blockspalten wurde mit Piezodynamometern (PD) gemessen.



(185) Abbildung 1. Verformungen der rechten Wand und Druck der Hinterfüllung auf die rechte Wand:

a - Schematische Darstellung der Wand, der in ihr untergebrachten EMG; b - Verformung der Wand in den Punkten A, B und C nach den Anzeigen der umgekehrten Pendel; c - Resultierende des Normaldrucks der Erde und des Wassers nach den BD-Anzeigen; d - mittlere Lufttemperatur; e - Wandreibungswinkel nach den TV-Anzeigen; 1 - gemessene Werte bei Kammer auf Unterwasser (UW); 2 - dasselbe bei Kammer auf Oberwasser (OW); 3 und 4 - Angaben über Ende und Anfang der Schifffahrt;  - Tangentialvorrichtung;  - Bodendynamometer; I - umgekehrtes Pendel.

Die Spannungen in der Bewehrung wurden mit Hilfe von Bewehrungsdynamometern (WD) gemessen, welche in die Vorder- und Rückseitenbewehrung des Betons und in die untere und obere Sohlenbewehrung eingebaut wurden und zwar in jedem Meßpunkt je zwei Geräte.

Die Betontemperatur wird mit Fernthermometern mit Halbleitergebern vom Typ MMT-4²⁾, die zusammen mit jeder WD-Gruppe und den Sperrstellen für die Dicke der Wände und der Sohle eingesetzt werden, gemessen.

Die Verformungen des Betons (Auseinandergehen der Blockfugen) werden mit Beton-Dehnungs- und Spaltmessern gemessen.

Der Temperaturverlauf der Kammer zeichnet sich durch große Unregelmäßigkeit der Wärmeverteilung bezüglich des Querschnitts der Kammerelemente und beträchtliche Temperaturgefälle bezüglich Dicke der Wände und der Sohle aus. Die größten durch jahreszeitliche Schwankungen der Betontemperatur bedingten Werte wurden in der Oberschicht des Betons von der Stirnkante der Wände (von -14° bis $+22^{\circ}$) und der Sohle (von -10° bis $+22^{\circ}$) aus beobachtet. Die Temperaturschwankungen waren in den Wänden von der Hinterfüllung her weniger bedeutend, besonders im unteren Teil, wo die Dicke der Wände am größten ist; sie schwankten zwischen $+2^{\circ}$ und $+12^{\circ}$. Die oberen Wandabschnitte gefroren im Winter in ihrer ganzen Dicke. Die Temperatur im unteren Teil der Sohle schwankte zwischen $+3^{\circ}$ und $+15^{\circ}$. Die Figuren für die Temperaturverteilung nach der Wand- und der Sohlendicke haben krummen Kurvenverlauf. (Abb. 2).

86)

2) MMT - medno - margancovyj - termistor:
Kupfer - Mangan- Thermistor.

Die größten Werte für das Temperaturgefälle nach der Dicke der Wände und der Sohle, gemessen in den Jahren 1969 bis 1970, sind in der Tabelle angegeben.

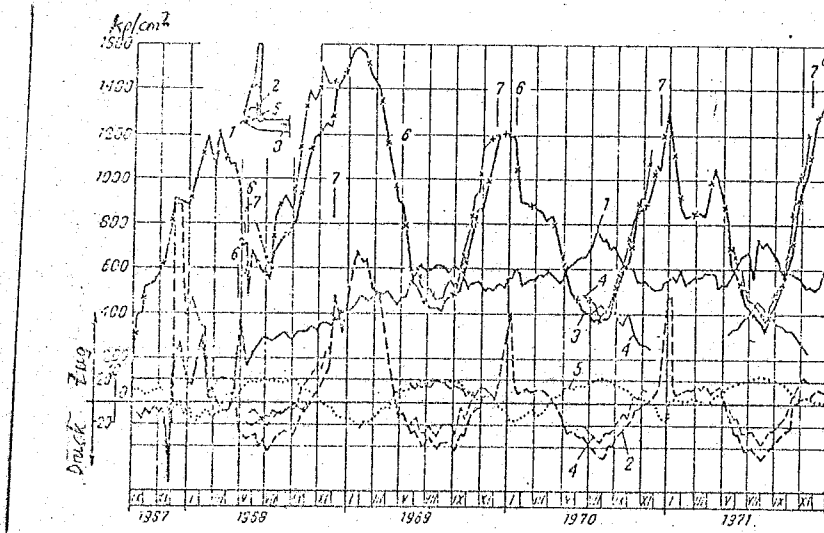


Abbildung 2. Spannungen in der Bewehrung der Sohle und der linken Wand nach den Anzeigen der Bewehrungsdynamometer:
 1,2,3 - Spannungen bei UW; 4 - dasselbe bei OW; 5 - Beton-
 temperatur; 6 und 7 - Angaben für das Fluten und Entleeren
 der Kammer.

T a b e l l e

| Beob- achtungs- zeit | Temperaturgefälle, °C. nach Wanddicke | | | |
|----------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------|-------|
| | unterer Abschnitt | mittlerer Abschnitt | oberer Abschnitt | Sohle |
| Sommer . . | 15 | 11 | 7 | 8 |
| Winter . . | 17 | 20 | 15 | 14 |

Als sehr wesentlich hat sich der Einfluß auf den Wärmeverlauf der Schleuse herausgestellt, wenn die Kammer jährlich geleert wurde, was in der Regel im Herbst - Winter durchgeführt wurde.

(187)

Die Grundwasserspiegel in der Hinterfüllung, die sich nach dem Fluten der Kammer zwischen den Schleusen im rechten Wasserpolster einstellten, waren während der in Betracht kommenden Beobachtungszeit praktisch unverändert.

Die Beobachtungen des Sickerdrucks in den Blockfugen der Wände zeigten, daß der Druck von der rückseitigen Kante her dem Grundwasserdruck entspricht und von der Vorderkante her - in der Schiffahrtszeit - dem Wasserdruck bei Kammer auf UW. Der Sickerdruck in den unteren Blockfugen der Wände und in der längs der Schlenachse verlaufenden Blockfuge verändert sich synchron mit den Schwankungen des Wasserspiegels in der Kammer und entspricht größtmäßig dem Wasserspiegel in der Kammer. Dies bezeugt die ungenügende Dichte der Fugen.

Die Beobachtungsergebnisse über Setzungen der untersuchten Kammerlamelle bezeugen den normalen Setzungsverlauf der Schleuse. Die hauptsächliche Zunahme der Setzungen wurde während des Bauens beobachtet. Vor dem Fluten der Kammer betrug sie ungefähr 20 mm während des Betriebs nahm die Setzung mit geringerer Intensität weiter zu; die gesamte Setzung betrug Ende 1970 25 mm.

Die Beobachtungen der Wandverformungen mit Hilfe von umgekehrten Pendeln wurden an der rechten Wand am Ende der ersten Schiffahrtszeit (September 1968) begonnen und an der linken zu Beginn der zweiten Schiffahrtszeit (Juni 1969) und wurden bei voller Kammer und bei Kammer auf Unterwasser durchgeführt. Die Beobachtungswerte ermöglichen es uns, ein genaues Bild von den Verformungen infolge Durchbiegung der Wände zu machen. Die Verformungen haben stark ausgeprägten jahreszeitlichen Charakter: in der Herbst- und Winterszeit bewegten sich die Wände zur Kammerseite hin, im Frühjahr/Sommer zur Hinterfüllung hin.

Eine solche Art der Wanddurchbiegung war durch die Temperaturverhältnisse bedingt. Die maximalen Abweichungen der Wandkrone zur Kammerseite hin betrugen 24 - 26 mm. Die noch verbleibenden Verformungen wurden in den ersten beiden Beobachtungsjahren gemessen und betrugen 9 - 11 mm.

In den Schiffsfahrtsperioden bewegten sich die Wände beim Füllen der Kammer zur Hinterfüllung hin. Die Abweichungen der Kammerkrone betrugen dabei 2 - 7 mm. Beim Füllen der Kammer beobachtete man eine Umkehrung des Fußquerschnitts der Kammer, die durch die Bewegung der Sohle hervorgerufen wurde. Die Art der Bewegung der Wände ist ihrer Höhe nach von den jahreszeitlichen Temperatur-Schwankungen und den veränderlichen hydrostatischen Belastungen verschieden (siehe Abb. 2). Durch die Beobachtungen wurde ein wesentlicher Unterschied in den Werten der Wandverformungen bei voller Kammer während der Schiffsfahrtszeit festgestellt. Am Ende der Schiffsfahrtsperiode nahm der Schwankungsbereich um 25 - 50 % zu, verglichen mit dem Beginn. Da diese Zunahme der Wandverformungen nicht von einer Zunahme des Erddrucks begleitet wird, rührt sie offenbar daher, daß sich die Verformungsbeschaffenheiten der Hinterfüllung ändern.

(188)

Bei diesen Beobachtungen mit Hilfe der umgekehrten Pendel wurden die Werte der Kammerwandbewegung in Längsrichtung (längs der Schleusenachse) gemessen. Die Wandbewegungen hatten jahreszeitlichen Charakter und schwankten zwischen 2 - 3 mm.

Die Beobachtungen der Verformungen der Blockfugen zeigten, daß die Fugen im unteren Wandabschnitt von der rückseitigen Kante her während der Bauzeit bis zu 0,07 mm auseinander gingen. Während der besagten Betriebszeit gingen diese Fugen zu, außer einer Fuge in der linken Wand, wo im Winter, während das gesamte Wasser abgepumpt war, die Werte, um die die Fuge auseinander ging, 0,03 - 0,04 mm betrugen. Es konnte eine Tendenz zur Zunahme des Klaffens dieser Fugen beobachtet werden.

Die Blockfuge an der Sohlenachse war in ihrer ganzen Höhe auseinandergegangen, wovon die Anzeigen der in dieser Fuge angebrachten PD und WD zeugen. Die Fuge klaffte infolge Temperaturverformungen der Sohlenblöcke während der Bauzeit bis zur Errichtung der Wände.

Der Erddruck der Hinterfüllung auf die Wände, der sich während des Baus einstellte, war unstetig: auf die linke Wand (vom Zwischenschleusenraum her) war der Druck um 25% größer als auf die rechte. Diese durch die unterschiedliche Einbaumethode der Hinterfüllung hervorgerufene Ungleichmäßigkeit nahm im Verlauf der ersten beiden Betriebsjahre auf 4% ab.

Die Druckverteilung des Bodens und des Grundwassers auf die Wände war höhenmäßig aufgrund verschiedener Verdichtung des Bodens unregelmäßig (Abb. 3). Die Druckfigur kommt der Coulomb-Figur nahe und unterscheidet sich von ihr nur im unteren Abschnitt, wo die Druckintensität abnimmt.

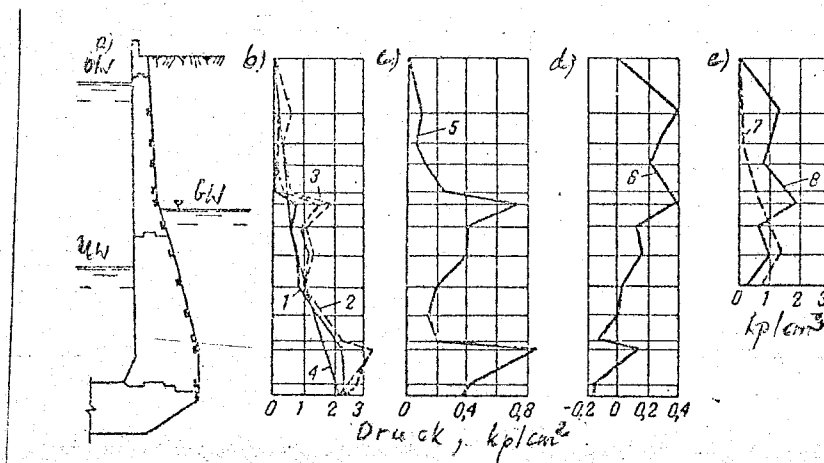


Abbildung 3. Normaldruck der Erde und des Wassers auf die rechte Wand: a - Schematische Darstellung der Wand und der in ihr untergebrachten BD; b - Normaldruckfiguren auf die Wand; 1 - gemessen am 10.2.1970; 2 - gemessen am 24.8.1970 bei UW; 3 - gemessen bei OW; 4 - errechnet; c - Figur der Normaldruckzunahme infolge Temperaturverformungen der Wand (Temperaturwiderstand); d - dasselbe beim Füllen der Kammer vom UW-Spiegel auf OW-Spiegel; e - Figuren des Bettungsmoduls der Hinterfüllung; 7 - bei Temperaturveränderungen der Wand; 8 - beim Füllen der Kammer.

(189) Ein solcher Druckverteilungsverlauf wurde früher auch schon an anderen Schleusen beobachtet. Der Gesamtdruck auf die Wände veränderte sich während der Untersuchungszeit zusammen mit den Wandverformungen. Als sich im Jahre 1970 praktisch alle äußeren Belastungen stabilisiert hatten, betrug die Extremwerte der Resultierenden aus dem Normaldruck des Bodens und dem Grundwasser bei Kammer auf UW: im Sommer auf die linke Wand 273 t/lfd. m und auf die rechte 262 t/lfd. m, im Winter entsprechend 216 und 201 t/lfd. m. Die Veränderungen des Erddrucks stimmen mit den Wandverformungen, die mit Hilfe der umgekehrten Pendel gemessen wurden, gut überein. (siehe Abb. 1 und 3).

Die Erddruckzunahme infolge Temperaturänderung betrug 27 - 30% des geringsten gemessenen Gesamterddrucks; der durch die Kammerfüllung hervorgerufene Erddruck dagegen 9 - 13% des Erddrucks bei Wasserspiegel auf UW.

Spezielle (in kürzeren Abständen durchgeführte) Beobachtungen im Frühjahr 1972 zeigten, daß ein Füllen der einen Schleusenkammer den Gesamterddruck auf die Nachbarschleusenkammerwand bis 5% erhöht.

Eine Aufgabe der Untersuchungen der Schleusenlamelle bestand darin, den Wandreibungswinkel (σ_a) zu bestimmen. Es wurde festgestellt, daß der Winkel σ_a eine variable Größe ist, die sich mit den jahreszeitlichen Verformungen der Wand von 32° im Winter bis 14° im Sommer ändert. Während der Schließungen beim Füllen der Kammer nahm σ_a bis auf 8° ab.

Die Erddruckreaktion auf die Schleusensohle wie auch der Druck auf die Wände stellten sich während des Baus ein und zeichneten sich durch eine starke Unregelmäßigkeit in ihrer Verteilung über die Sohle aus. Nach dem Fluten der Kammern nahm der Druck im Gesamten zu, doch die Druckverteilung blieb dieselbe. Die Figuren für die Erddruckreaktion haben sattelartige Form mit Ordinaten in der Mitte ungefähr $2 - 3 \text{ kp/cm}^2$, an den Rändern $3 - 5 \text{ kp/cm}^2$ (Sommer 1970), (Abb. 4).

Die in der Sohle angebrachten Geräte reagieren auf Veränderungen der hydrostatischen Belastung.

Beim Füllen der Kammer bis OW-Spiegel nimmt der Sohldruck nach den Anzeigen dieser Geräte um 20% zu, verglichen mit dem Druck bei UW.

Beobachtungen der Spannungen in der Bewehrung mit Hilfe der WD liefern uns ein zufriedenstellendes Bild vom Spannungszustand der Kammer. In der Bauzeit wurden die größten Zugspannungen in der Bewehrung unterhalb der Vorderkante der Wände beobachtet; sie erreichten 1250 kp/cm^2 in der linken und 570 kp/cm^2 in der rechten Wand. In der Sohle betrug die maximalen Zugspannungen die um die Blockfuge an der Kammerachse in der unteren Bewehrung registriert wurden, ungefähr 1600 kp/cm^2 .

(190)

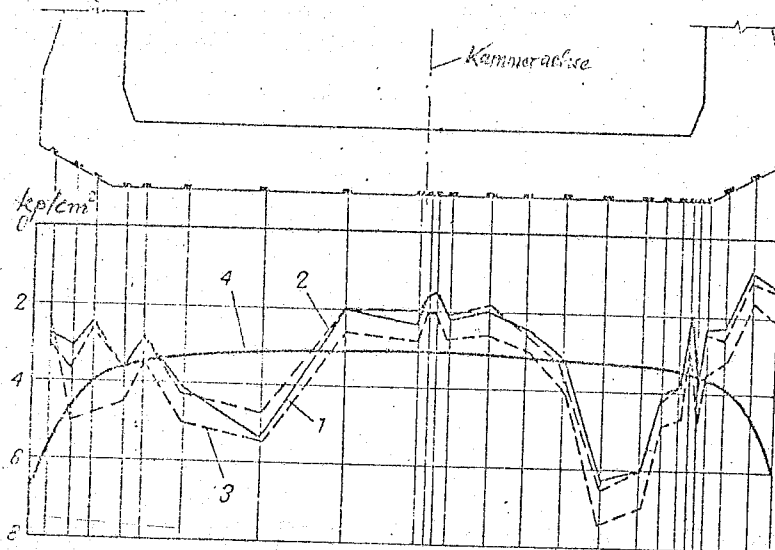


Abbildung 4. Sohldruckverteilung:

1 - gemessen am 15.1.1971; 2 - am 20.8.1971 bei UW; 3 - dasselbe jedoch bei OW; 4 - rechnerisch.

Während der Betriebszeit handelte es sich bei den Spannungen in der Bewehrung der Sohle und in der rückwärtigen Bewehrung der Wände hauptsächlich um Zugspannungen, bei denen in der vorderen Bewehrung um Druckspannungen. Die Spannungsveränderungen während eines Jahres hatten stark ausgeprägten jahreszeitlichen Charakter (Abb. 5).

Das Ausmaß der Schwankungen erreichte 700 kp/cm^2 in den Wänden (Vorderkante) und 1000 kp/cm^2 in der Sohle (obere Bewehrung, Blockfuge).

Große Zugspannungen traten in der rückseitigen Bewehrung des unteren Wandabschnittes an der Blockfuge auf. Im Sommer 1970 betragen Sie 790 kp/cm^2 in der linken und 540 kp/cm^2 in der rechten Wand. In der Bewehrung des oberen Sohlenabschnitts wie auch im Bereich der Blockfuge wurden die größten Spannungen von etwa 1600 kp/cm^2 im Winter 1969 festgestellt. Die hohen Zugspannungen verursachten ein Auseinandergehen der Blockfugen, worüber die Angaben der Tensometer und Piezodynamometer berichten. Infolge der im wissenschaftlichen Forschungsinstitut von "Hydroprojekt" durchgeführten experimentellen Untersuchungen der Arbeitsweise der BD wurde festgestellt, daß die tatsächlichen Spannungen in der Bewehrung im Bereich der Blockfugen nach ihrer Öffnung um 1,5 bis 2 mal größer sein können als es die BD anzeigten. So betragen die tatsächlichen größten Spannungswerte in der Schleusenbewehrung während der Betriebsdauer ungefähr 1400 kp/cm^2 in der linken, 1100 kp/cm^2 in der rechten Wand und 2200 kp/cm^2 in der Sohle.

(191)

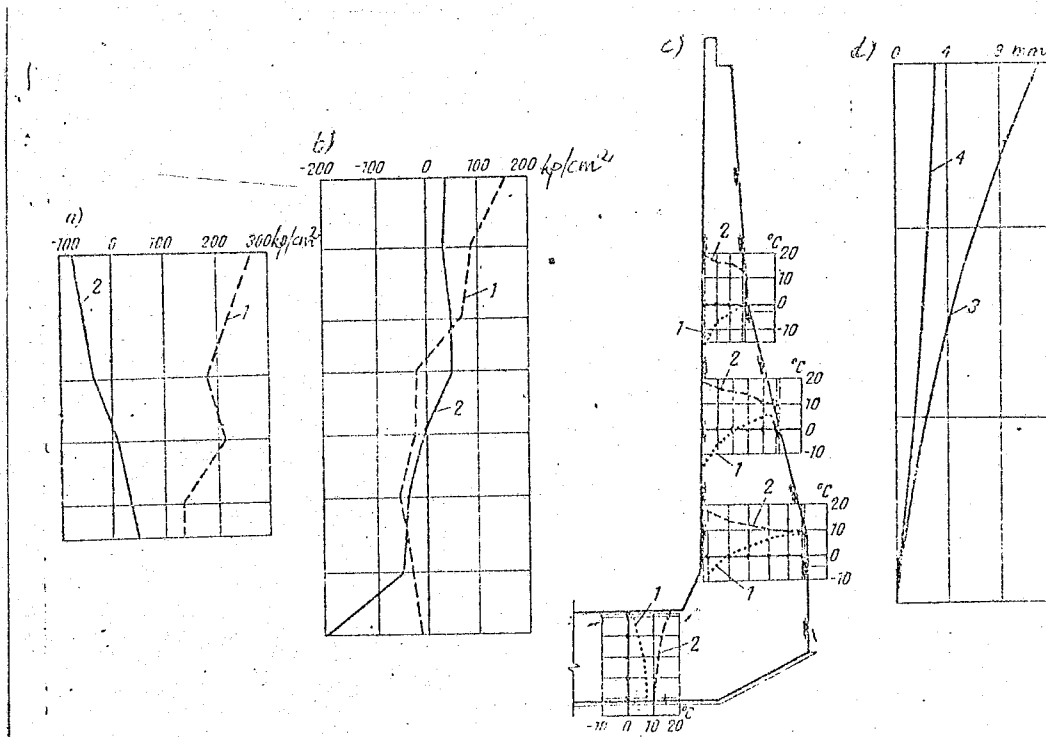


Abbildung 5. Spannungszunahme in der Bewehrung und Verformungen in der rechten Wand infolge Wasserdruck in der Schleuse und jahreszeitlicher Temperaturschwankungen:

a - Spannungszunahme in der vorderen Wandbewegung von 1 - 23.6.1970 bis 15.1.1972 und 2 - beim Füllen der Kammer am 24.6.1970; b - dasselbe in der rückseitigen Bewehrung; c - schematische Darstellung der Wand, Anordnung der EMG und Temperaturverteilung im Wand- und Sohlen-Querschnitt, 1 - am 25.12.1970 und 2 - 29.6.1971; d - Verformungen der Wand infolge 3 - Temperaturveränderung vom 24.6.1970 bis 3.2.1971 und 4 - infolge Füllen der Kammer am 24.6.1970.

Wenn die Kammer bis zum OW-Spiegel gefüllt wurde, dann änderte sich der Spannungszustand der Kammer in geringerem Maße als dies durch die Temperatureinwirkungen verursacht wurde. Der Verlauf der Veränderung der Spannungen in der Bewehrung beim Füllen der Kammer ist in Abb. 5a und b dargestellt; daraus ist ersichtlich, daß sich die Spannungen im oberen Wandabschnitt in der vorderen Bewehrung zur Druckseite hin verändern und in der rückseitigen Bewehrung zur Zugseite hin um $60 - 100 \text{ kp/cm}^2$; im unteren Wandabschnitt hatten die Veränderungen umgekehrtes Vorzeichen, durchschnittlich um $200 - 300 \text{ kp/cm}^2$ jeweils. In der Sohle änderten sich die Spannungen um 200 kp/cm^2 zur Zugseite hin. Die Tendenz zur Zunahme der Zugspannungen in der Bewehrung der Wände und der Sohle mit der Zeit ist festzustellen.

(192)

Nach den gemessenen Wandverformungen und dem Erddruck wurden die tatsächlichen Werte des Bettungsmoduls (k_s) der Hinterfüllung errechnet (siehe Abb. 3e). Aus der Zeichnung ist ersichtlich, daß sich Größe und Verlauf von k_s mit der Tiefe ändern nach der jahreszeitlichen Wandverformung (7) und den Verformungen beim Füllen der Kammer bis auf OW (8). Die Form der Figur für k_s ist eine Wiederholung der Form der Figuren für die Erddruckzunahme (5) und (6). Die nach den Angaben der Beobachtungen erzielten Werte des Bettungsmoduls erreichen $1,2 - 2,2 \text{ kp/cm}^2$ und ändern sich mit der Tiefe nach einem nichtlinearen Gesetz.

Zur Bewertung des Zustands der Kammer und der gewonnenen Ergebnisse wurden Berechnungen über den Erddruck der Hinterfüllung auf die Kammerwände, der Erddruckreaktion auf die Sohle und der Spannungen in der Bewehrung im Bereich der Fugen des unteren Wandabschnittes durchgeführt.

Der gemessene Druck auf die Wände betrug 77 - 94% vom errechneten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Belastungen. Die Fläche der gemessenen Erddruckreaktion auf die Sohle betrug ungefähr 109% der nach den tatsächlichen Belastungen errechneten Druckfigur. Die Spannungen in der rückseitigen Bewehrung, die in der unteren Blockfuge gemessen wurden, betrugen 77 - 127% der nach den tatsächlichen Belastungen errechneten Spannungen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Während der Bauzeit treten in der Bewehrung an den Blockfugen der Sohle und der Kammerwände unter dem Einfluß von Temperaturverformungen große Zugspannungen auf, welche ein Auseinandergehen der Fugen hervorgerufen haben. In der untersuchten Betriebszeit waren die Fugen die schwächsten Stellen der Konstruktion. Die Spannungen in der Bewehrung im Bereich der Fugen erreichten 2190 kp/cm^2 und die Fugen öffneten sich 0,05 mm. Bei der Planung von ähnlichen Anlagen müssen unbedingt Kontrollberechnungen über die Verformungen und Spannungen während der Bauzeit durchgeführt werden.

2. Der erste Versuch zur Anwendung von umgekehrten Pendeln zur Messung der Durchbiegungsverformungen der Wände hat sich voll bewährt. Es liegt ein detailliertes Bild über Wandverformungen unter dem Einfluß der Lufttemperaturschwankungen und der Wasserstände in der Kammer bei Schleusungen vor. Die Temperaturverformungen der Wände sind um 5 - 6 mal größer als die durch die veränderliche hydrostatische Belastung bei den Schleusungen hervorgerufenen Veränderungen. Die Wandverformungen infolge Wasserdruck in der Schleuse nehmen zum Ende der Schiffsfahrtsperiode um 25 - 50% zu, verglichen mit dem Beginn der Schiffsfahrtszeit.

3. Die gemessene Erddruckreaktion auf die Schleusensohle betrug etwa 109%; der Druck auf die Wand 77 - 94% des errechneten;

die maximalen Zugspannungen in der rückseitigen Bewehrung des Fußquerschnitts der Wände beliefen sich auf 77 - 102% der errechneten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Belastungen, was bestätigt, daß der Schleusenammerzustand mit den Rechen- voraussetzungen ziemlich gut übereinstimmen. Die Werte des Bettungsmoduls der Hinterfüllung, die nach den Angaben der Beobachtungen gewonnen wurden, betragen ungefähr 0,5 - 2,2 kp/cm² und ändern sich mit der Tiefe nach einem nichtlinearen Gesetz.

(193)

4. Die Beobachtungen bestätigen, daß der untersuchte Schleusenammerabschnitt zufriedenstellend arbeitet. Der Endzustand im Spannungsverformungsverlauf der Konstruktion ist gegenwärtig noch nicht erreicht. Die Geräte registrieren eine Zunahme des Erddrucks, der Spannungen in der Bewehrung und der Wandverformungen mit der Zeit. Die Messungen mit Hilfe der eingebauten Geräten müssen noch über eine Reihe von Jahren fortgesetzt werden.

Stuttgart, den 9. Februar 1976

Übersetzung von

Ottmar Pertschi

(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer