Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 67 (1949)
Heft: 20

Artikel: Zerstörung von Talsperren und Dämmen
Autor: Kirschmer, Otto
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84059

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: 08.08.2025

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

67. Jahrgang Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 20

Zerstörung und Schutz von Talsperren und Dämmen

DK 627.82 : 0046

Von Prof. Dr. Ing. OTTO KIRSCHMER, Paris

Während des zweiten Weltkrieges wurden in der Nacht vom 16. auf den 17. Mai 1943 von der Royal Air Force (RAF) erstmals drei Talsperren in Deutschland an der Möhne, der Sorpe und der Eder in überraschendem Tiefangriff aus etwa 18 m Höhe mit schweren, in Rotation versetzten Spezialbomben (Rollbomben) angegriffen[1]). Die Bilder 1 und 2 orientieren über die Lage dieser Bauwerke. Die durch die Zerstörungen ausgelösten Wasserwellen richteten grösste Verheerungen an. Sie wurden später genau untersucht, um Unterlagen zum Vorbereiten von Massnahmen zur Verhütung oder Milderung derartiger Schäden in Zukunft zu erhalten. Die Bekanntgabe der Ergebnisse dieser Untersuchungen dürfte von allgemeinem Interesse sein.

I. Beschreibung der Talsperren und der entstandenen Schäden

A. Die Möhnetalsperre

Dieses Bauwerk wurde von 1908 bis 1913 nach den Plänen von *E. Link* hauptsächlich zum Zwecke der Trink- und Brauchwasserversorgung des Ruhrgebietes und zum Ausgleich des Wasserabflusses in der Ruhr errichtet. Das Einzugsgebiet der Sperre umfasst 430 km²; der mittlere Jahreszufluss beträgt 240 Mio m³, das Speichervermögen 134 Mio m³, die Oberfläche 10,2 km². Die im Grundriss bogenförmige Schwergewichtsmauer hat 650 m Kronenlänge bei einer Höhe von 40 m (höchster Wasserstand 32 m). An der Krone ist die Mauer 6,25 m und am Fuss 34 m stark (Bild 3).

Der Angriff der RAF erfolgte zu einer Jahreszeit, als die Möhnetalsperre voll gefüllt war. Um 0.49 h des 17. Mai 1943 barst der obere Teil der Sperrmauer, nachdem eine Bombe im Stausee dicht an der Sperrmauer in vermutlich 10 m Wassertiefe explodiert war. Im mittleren Teil der Mauer entstand ein Loch von 76 m oberer Breite und 22 m Tiefe. Durch diese Bresche liefen innerhalb von zwölf Stunden 116 Mio m³ Wasser aus. Der Inhalt des Stausees am 16. Mai 1943 betrug 132,2 Mio m³. Die anfängliche Abflussmenge wurde nachträglich zu 8800 m³/s ermittelt. In dem engen Möhnetal ergab sich damit eine Sturzwelle von 10 m Höhe, die weit über dem höchsten bekannten Hochwasser des Jahres 1890 lag und grosse Verheerungen anrichtete. Etwa 1200 Menschen kamen ums Leben. Bis in die Gegend von Hagen (rd. 65 km flussabwärts) wurden die tiefer gelegenen Häuser weggerissen oder beschädigt; bis in eine Entfernung von 50 km von der Sperre waren sämtliche Brücken zerstört. Augenzeugen berichten, dass sich an den Brücken Stauhöhen bis 2 m ergaben, ehe sie einstürzten. Das Kraftwerk I am Fuss der Talsperre (4800 kW Leistung in vier Aggregaten) und das kleine Kraftwerk II am Ausgleichbecken in Günne (300 kW Leistung in zwei Maschinen) waren völlig verschwunden. Bei der Einmündung der Ruhr in den Rhein (148,5 km von der Möhnetalsperre entfernt) stieg der Pegel beim Durchgang des Scheitels der Hochwasserwelle — 25 ½ Stunden nach der Katastrophe — noch um rd. 4 m an. Dies bedeutete eine Erhöhung der Wasserführung des Rheins um 1100 m³/s.

Da die Möhnetalsperre für das dicht besiedelte Ruhrgebiet einer der Hauptträger der Wasserversorgung ist, waren die Folgen des Bruches der Sperre sehr schwerwiegend, zumal da durch die eingetretenen Ueberschwemmungen auch die meisten anderen Wasserversorgungsanlagen an der Ruhr bis in die Gegend von Essen überflutet und stillgelegt worden waren. Zahlreiche Städte, wie Hamm, Hagen, Bochum und Dortmund waren ohne Wasser. Auch das Pumpspeicherwerk in Herdecke a. Ruhr — 60 km unterhalb der Möhnetalsperre — das mit 132 000 kW Leistung eines der wichtigsten Kraftwerke des Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerkes (RWE) ist, lag 14 Tage still, da das Maschinenhaus etwa 2 m unter Wasser gestanden hatte.

B. Die Sorpetalsperre

Hier handelt es sich um einen in den Jahren 1922 bis 1933 ebenfalls nach Plänen und unter der Leitung von *E. Link* errichteten Erddamm mit entwässertem Betonkern als Dichtung (Bild 3). Die Dammhöhe über Talsohle beträgt 60 m, die maximale Wasserhöhe 57 m, die Kronenlänge 700 m. Wasserseitig und luftseitig sind die Böschungen im Mittel 1 : 2,25 bzw. 1 : 2,50 geneigt. Der wasserseitige Teil des Dammes besteht aus dichtem Material und einer Schutzschicht, um Eindringen von Wasser zu erschweren. Der luftseitige Teil ist dagegen aus durchlässigem Material hergestellt, damit Wasser, das durch den dichteren Teil und den Kern eventuell durchgesickert ist, möglichst schnell abfliessen kann. Das Fassungsvermögen der Sorpetalsperre beträgt 81 Mio m³. Bei voller Füllung entsteht ein Stausee von 3,8 km² Oberfläche. Aus ihrem Einzugsgebiet fliessen der Talsperre jährlich 31 Mio m³ Wasser zu.

Der Luftangriff auf die Sorpetalsperre erfolgte zur gleichen Stunde wie der auf die Möhnetalsperre, offenbar in der Absicht, beide Talsperren gleichzeitig zum Einsturz zu bringen. Obgleich die Krone des Erddammes der Sorpetalsperre zwei Volltreffer erhielt, die Sprengtrichter von 12 m Tiefe aufgerissen hatten, *hielt der Erddamm stand.* Später wurden die Angriffe auf die Sorpetalsperre mehrmals wiederholt, insbesondere in einem zusammengefassten Unternehmen am 15. Oktober 1944. Insgesamt waren bei allen Angriffen elf Treffer auf dem Erddamm erzielt worden, ohne dass er eingestürzt oder undicht geworden wäre. Aus Sicherheitsgründen hatte man allerdings den Wasserspiegel im Staubecken nach dem ersten Angriff um einige Meter abgesenkt.

Die Tatsache, dass die Schwergewichtsmauer der Möhnetalsperre aufgerissen wurde, während der Erddamm der Sorpetalsperre standhielt, ist von entscheidender Bedeutung. Wäre

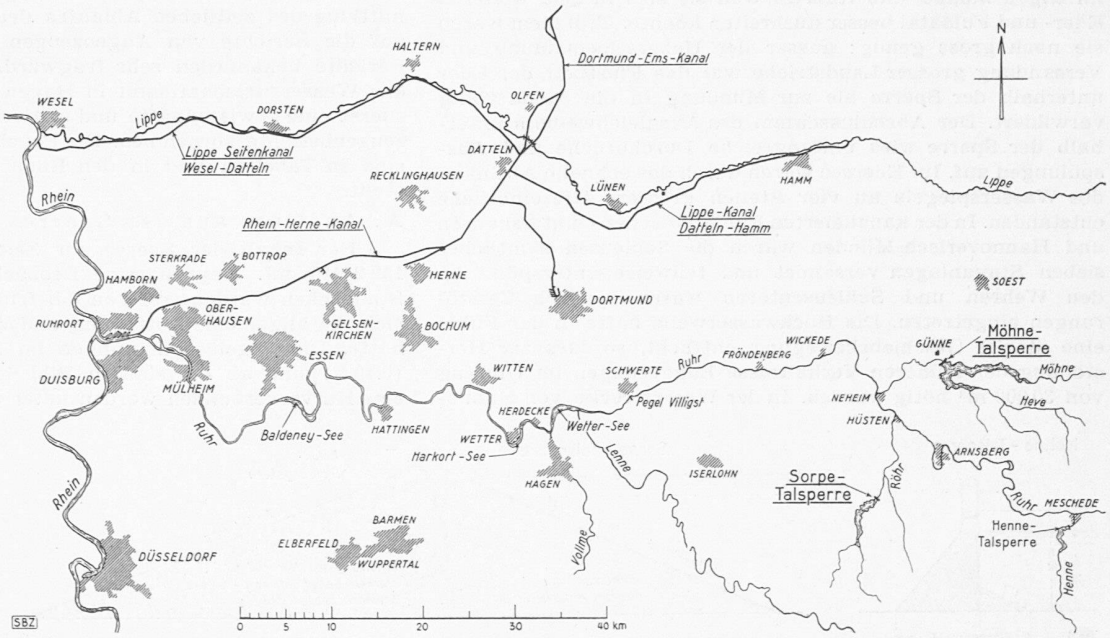

Bild 1. Lageplan der Möhne- und Sorpetalsperre und der Schiffahrtskanäle im Ruhrgebiet; Masstab 1 : 800000

[1]) Vgl. «Grundsätzliches zur Wahl des Staumauertyps für grosse Staubecken». SBZ 1948, Nr. 11, Seite 150*.

in den frühen Morgenstunden des 17. Mai 1943 auch die Sorpetalsperre zum Auslaufen gebracht worden, und hätten sich die Hochwasserwellen der Möhne- und Sorpetalsperre vereinigt und überlagert, so wären die Folgen für das Ruhrgebiet unabsehbar geworden.

C. Die Edertalsperre

Diese Sperre befindet sich bei Waldeck in der Nähe von Kassel; sie war anschliessend an die geglückte Aktion gegen die Möhnetalsperre das Ziel des gleichen Kommandos der RAF. Beide Sperrmauern liegen in der Luftlinie nur etwa 80 km auseinander. Die Edertalsperre ist die zweitgrösste Talsperre Deutschlands (nach der Bleilochsperre an der Oberen Saale in Thüringen) und als Schwergewichtsmauer in Bruchsteinmauerwerk in den Jahren 1908 bis 1913 erbaut worden. Sie fasst 202 Mio m³ Wasser. Bei voller Füllung entsteht dabei der stattliche und landschaftlich sehr reizvolle Edersee von 11,7 km² Oberfläche, der einen mittlern Jahreszufluss von 500 Mio m³ erhält. Der Edersee dient einerseits dem Hochwasserschutz, anderseits der Niedrigwasser-Anreicherung der Fulda, der Weser und der Speisung des Mittelland-Kanales, d. h. der Verbesserung der Schiffahrt auf diesen Wasserstrassen. Die Edertalsperre diente aber auch Zwecken der Kraftgewinnung. An ihrem Fusse sind die beiden Kraftwerke Hemfurth I (13000 kW) und Hemfurth II (17000 kW) mit zusammen neun Maschinensätzen eingebaut. Ferner ist in Hemfurth das «Pumpspeicherwerk Waldeck» mit einer Höchstleistung von 115000 kW in vier Turbinen errichtet worden und endlich besteht unterhalb der Talsperre am Ausgleichweiher der Eder bei Affoldern noch ein kleines Laufkraftwerk mit einer einzigen Turbine von 2560 kW Leistung.

Die Höhe der im Grundriss bogenförmigen, an der Krone 400 m langen Mauer beträgt 48 m bei einer maximalen Wasserhöhe von 41 m. An der Krone ist die Wand rd. 6 m, am Fuss 35 m stark. Der Querschnitt der Sperrmauer ist aus Bild 3 ersichtlich.

Beim Angriff auf die Edertalsperre am 17. Mai 1943 war um 1.20 h in der Nähe des linken Turmes (von der Luftseite aus gesehen) eine Sprenglücke in der Mauer von etwa 25 m Halbmesser entstanden (Bilder 4 und 5). Die Bresche war also kleiner als bei der Möhnetalsperre, weshalb der Ausfluss hier länger dauerte als dort. Die maximale Abflussmenge nach erfolgtem Bruch wurde zu 8500 m³/s ermittelt, also in der selben Grössenordnung wie bei der Möhnetalsperre, aber die gesamte Auslaufzeit für 154,4 Mio m³ Wasser — der Inhalt des Edersees zur Zeit des Luftangriffes betrug 202,4 Mio m³ — erstreckte sich über 36 Stunden.

Ausser der durch die Sprengwirkung entstandenen Bresche wies die Sperrmauer an mehreren Stellen Risse und Lockerungen auf. In den Kraftwerken Hemfurth und Affoldern wurden schwere Schäden festgestellt. Die Hochwasserwelle hatte indessen nicht die selben katastrophalen Folgen wie im engen Möhne- und Ruhrtal, weil sie sich in dem weiteren Eder- und Fuldatal besser ausbreiten konnte. Trotzdem waren sie noch gross genug: ausser der Ueberschwemmung und Versandung grosser Landstriche war das Flussbett der Eder unterhalb der Sperre bis zur Mündung in die Fulda völlig verwildert. Der Abschlussdamm des Ausgleichweihers unterhalb der Sperre wies umfangreiche Durchbrüche und Ausspülungen auf. Im Edersee waren durch das schnelle Absinken des Wasserspiegels an vier Stellen grössere Ufereinbrüche entstanden. In der kanalisierten Fulda zwischen Guntershausen und Hannoverisch-Münden waren die Schleusen sämtlicher sieben Stauanlagen versandet und teilweise unterspült. An den Wehren und Schleusentoren waren vielfach Zerstörungen eingetreten. Die Hochwasserwelle hatte in der Fulda eine starke Geschiebebewegung entfacht, so dass zur Herstellung der früheren Verhältnisse Baggerungen im Umfang von 30000 m³ nötig wurden. In der Weserstrecke, von Hannoverisch-Münden ab, setzte sich die Geschiebebewegung fort, so dass Untiefen entstanden, deren Behebung weitere Baggerungen (rd. 5000 m³) erforderte. Ausserdem wurden in der Weser rd. 1000 Buhnen zerstört oder beschädigt. Sowohl an der Fulda als auch an der Weser waren die Flussufer stark angegriffen; allein an der Weser mussten etwa 5,5 km Uferschutzbauten erneuert werden.

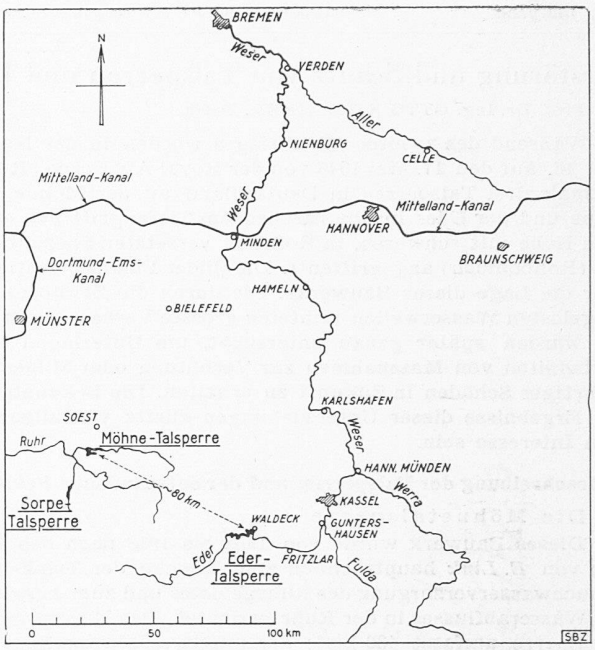

Bild 2. Uebersicht über das Flussgebiet Eder-Fulda-Weser-Mittellandkanal; Masstab 1 : 3000000

II. Ablauf der Hochwasserwelle aus der Möhnetalsperre

Die Rekonstruktion des Ablaufes der Hochwasserwelle nach der Katastrophe an der Möhne war durch den Umstand erschwert, dass sehr viele Pegel bis weit von der Unfallstelle entfernt von den Fluten weggerissen oder schwer beschädigt worden waren. Diejenigen Pegel aber, die noch arbeiteten, waren meist für das Registrieren der aussergewöhnlichen Wasserstände nicht eingerichtet. Aus diesen Gründen liegen aus dem Möhne- und oberen Ruhrtal nur vereinzelte sichere Pegelbeobachtungen vor. Erst vom mittleren Ruhrtal ab, d. i. flussabwärts von Hagen, waren regelmässige und einwandfreie Messungen möglich. Allerdings konnte man den höchsten Stand des Hochwassers auch ohne Pegelaufzeichnungen an den Spuren feststellen, die das Hochwasser in der Landschaft hinterlassen hatte; schwieriger dagegen war die Ermittlung des zeitlichen Ablaufes der Welle. Man war dabei auf die Berichte von Augenzeugen angewiesen. Da solche Berichte bekanntlich sehr fragwürdig sein können, musste das Wasserwirtschaftsamt in Hagen als zuständige Behörde zuerst eine gewissenhafte und kritische Prüfung aller Augenzeugenberichte vornehmen. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 1 und in den Bildern 6 und 7 zusammengestellt.

A. Ausfluss aus der Sperre

Der Inhalt der Sperre zur Zeit des Angriffes betrug 132,2 Mio m³. Regelmässige Beobachtungen des Pegels im Staubecken wurden erst von 6 h früh ab gemacht, nachdem sich die allgemeine Aufregung und Verwirrung etwas gelegt hatte. Die Pegelbeobachtungen im Zeitpunkt des Angriffs (0.49 h) und ab 6 h sind in Bild 6 eingetragen und durch eine Kurve verbunden worden unter der Voraussetzung, dass

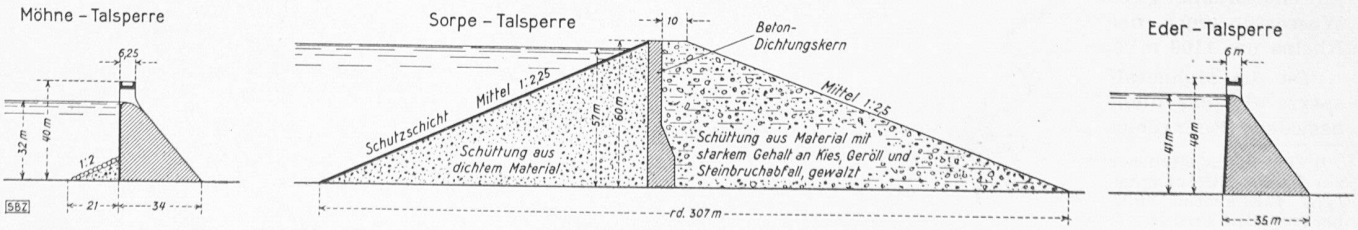

Bild 3. Querschnitt durch die Sperren im Möhne-, Sorpe- und Edertal: Masstab 1 : 3000

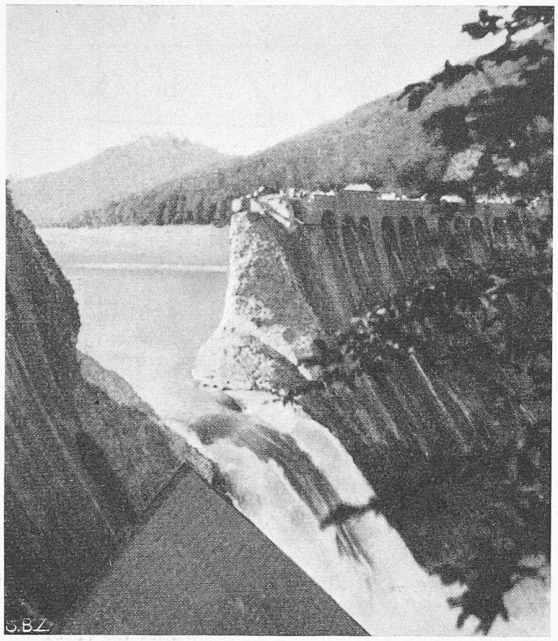

Bild 4. Bresche in der Edertalsperre

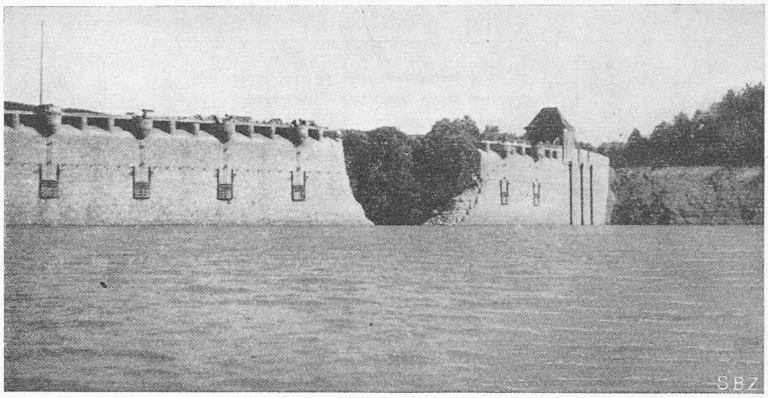

Bild 5. Edertalsperre nach der Zerstörung, Oberwasserseite

der Ausfluss gleichmässig erfolgte und die Bresche in der Sperrmauer von Anfang an die endgültige Grösse hatte.

Aus der rekonstruierten Kurve des Beckeninhaltes V_1 in Funktion der Zeit sind für Abstufungen von 10 zu 10 Mio m³ (Spalte 3 in Tabelle 1) die Uhrzeiten t und deren Differenzen Δt bestimmt worden (Spalten 1 und 2). Da die Möhnetalsperre zwei Ausläufer, das Heve- und Stockum-Vorbecken besitzt, die durch nur schmale Durchlässe mit dem Hauptbecken verbunden sind, wurde dort eine bestimmte Wassermenge zurückgehalten. Dies ist in Spalte 4 der Tabelle 1 berücksichtigt.

Die ausgeflossene Wassermenge $Q = f(t)$ lässt sich entweder als Quotient $Q = \Delta V / \Delta t$ (Spalte 7) oder dadurch ermitteln, dass man Tangenten an die Kurve $V = f(t)$ zieht und aus deren Neigung gegen die Horizontale den Differentialquotienten $Q = dV/dt$ (Spalte 8) bestimmt. Auf diese Weise ergibt sich der Grösstwert von Q zu 8800 m³/s. Die Ausflussmenge nimmt verhältnismässig rasch ab: sie betrug um 6 h, also rd. 5 Stunden nach dem Bruch der Sperre, noch 2000 m³/s und weitere 3 Stunden später 1000 m³/s (Bild 6). Der Ausflussvorgang kann um 12 h als im wesentlichen beendet angesehen werden.

B. Zeitlicher Ablauf der Hochwasserwelle im Möhne- und Ruhrtal

Die Ermittlungen des Wasserwirtschaftsamtes in Hagen sind in Bild 7 graphisch dargestellt. Die Kurven stellen einen idealisierten Verlauf der Hochwasserwelle dar. In Wirklichkeit sind sie weniger regelmässig, da der Ablauf der Welle

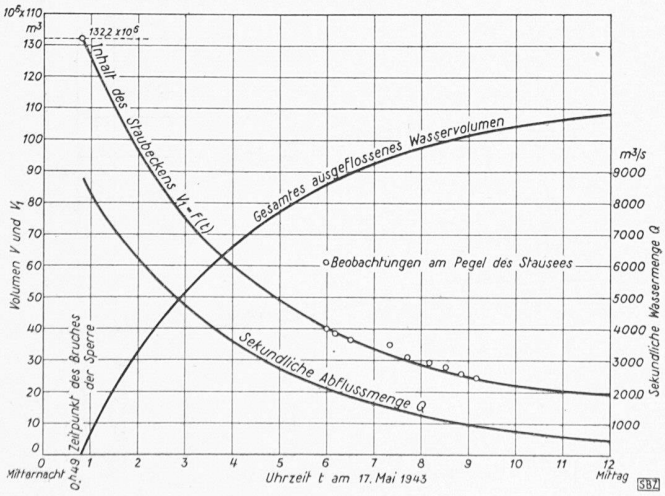

Bild 6. Ausfluss aus dem Staubecken der Möhnetalsperre

von der wechselnden Gestaltung des Tales abhängig ist. Wo das Tal weit wird, hat die Welle Gelegenheit zu Ausuferungen und verzögert sich dadurch. Dies war namentlich in den drei Ruhrseen der Fall, nämlich im Hengstey-See bei Hagen (1,6 km² Fläche und 2,8 Mio m³ Speichervermögen), im anschliessenden Harkort-See (1,4 km² Fläche und 3,3 Mio m³) und im Baldeney-See am Südrand der Stadt Essen (2,4 km² Fläche und 9 Mio m³). Zur Zeit des Unglücks an der Möhnetalsperre war der Baldeney-See als Schutzmassnahme gegen Luftangriffe (Erschwerung der Orientierung) vollständig leer, während der Hengstey- und Harkort-See gefüllt waren, aber sofort nach Bekanntwerden der Katastrophe abgelassen wurden[2]).

In welchem Ausmass der Baldeneysee die ankommende Hochwasserwelle aufspeicherte, zeigte sich darin, dass der Hochwasserspiegel flussabwärts vom Baldeneysee unter denjenigen des Katastrophenhochwassers von 1890 sank, während er flussaufwärts stets darüber lag. Beim Eintritt in den Baldeneysee betrug die Wassermenge etwas über 2500 m³/s, so dass die Hochwasserwelle dort theoretisch eine Stunde lang hätte aufgehalten werden können.

Die Kurven 1 und 2 (Bild 7) zeigen das Eintreffen des Wellenkopfes (Beginn des Steigens) und den Durchgang des Wellenscheitels für die gesamte, rd. 150 km lange Strecke von der Möhnetalsperre bis zur Mündung der Ruhr. Die Zeitskala links gilt nur für diese beiden Kurven. Naturgemäss wird die Zeit-

Tabelle 1

Uhrzeit am 17. Mai 1943 t	Zeitdifferenz in Sekunden Δt	Inhalt des Staubeckens in Mio m³ V_1	V_2	Differenz in Mio m³ ΔV	Ausgeflossenes Wasservolumen in Mio m³ V	Sekundlich ausgeflossene Wassermenge in m³/s Q	Q
1	2	3	4	5	6	7	8
0^{49}		132,2	132,20		0		8800
	1380			11,76		8520	
1^{12}		120	120,44		11,76		8060
	1080			8,42		7800	
1^{30}		110	112,02		20,18		7040
	1320			8,55		6480	
1^{52}		100	103,47		28,73		6480
	1440			8,52		5920	
2^{16}		90	94,95		37,25		5560
	1680			9,50		5660	
2^{44}		80	85,45		46,75		5040
	2040			9,47		4640	
3^{18}		70	75,98		56,22		4350
	2460			9,69		3940	
3^{59}		60	66,29		65,91		3600
	3180			10,00		3140	
4^{52}		50	56,29		75,91		2780
	4020			10,00		2490	
5^{59}		40	46,29		85,91		1990
	6000			10,00		1670	
7^{39}		30	36,29		95,91		1530
	12 300			10,00		813	
11^{04}		20	26,29		105,91		556

[2]) Der Warndienst funktionierte beim Bruch der Möhnetalsperre vorzüglich. In kürzester Zeit waren die Ortschaften und Städte des Möhne- und Ruhrtales von dem Unglück unterrichtet. Die vielen Todesopfer namentlich in der Stadt Neheim rühren davon her, dass sich die Bevölkerung der Tragweite der Katastrophe nicht bewusst war.

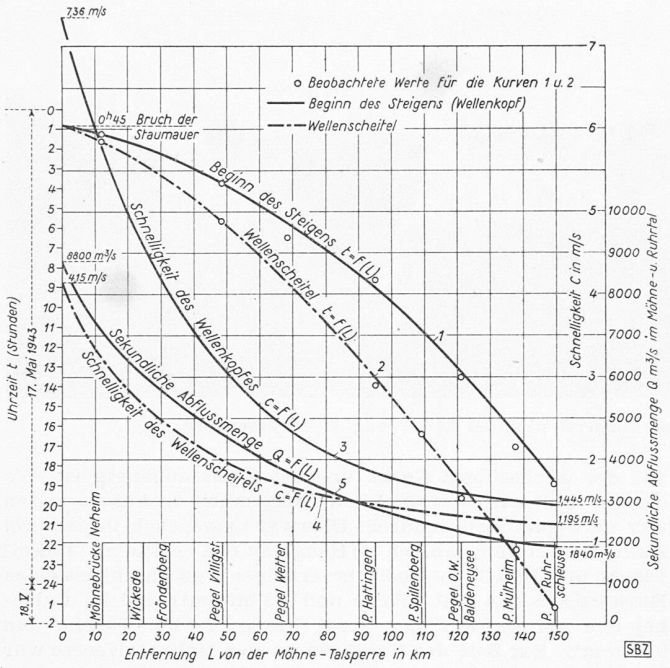

Bild 7. Hochwasserwelle beim Bruch der Möhnetalsperre; zeitlicher Verlauf, Schnelligkeit und Abflussmengen

differenz zwischen dem Beginn des Steigens und dem Durchgang des Hochwasserscheitels mit zunehmender Entfernung immer grösser; sie beträgt bei der Ruhrmündung etwa sechs Stunden.

Weiter zeigt das Bild 7 die Schnelligkeit der Welle und zwar die des Wellenkopfes (Kurve 3) und des Wellenscheitels (Kurve 4). Sie ergab sich mit Hilfe der Tangenten an die Kurven 1 und 2 gemäss $c = dL/dt$. Tabelle 2 gibt einige Hauptwerte wieder.

Tabelle 2. Schnelligkeit des Wellenkopfes und des Wellenscheitels im Möhne- und Ruhrtal in m/s.

Stelle	Sperre	Mündung in den Rhein	Durchschnittswert
Wellenkopf	7,36	1,445	2,88
Wellenscheitel	4,15	1,195	1,89

C. Wasserstände und Abflussmengen

Der Wasserspiegel überstieg im Möhnetal den höchsten bisher bekannten Hochwasserspiegel vom Jahre 1890 um durchschnittlich 3 bis 4 m. In der Gegend von Hagen (etwa 65 km unterhalb der Talsperre) lag er um rd. 2 m und vor dem Baldeneysee noch um etwa 0,50 m höher als beim Hochwasser von 1890; nach diesem See blieb er bis etwa um 0,50 m unter demjenigen von 1890. Besonders hohe Wasserstände wurden überall dort festgestellt, wo sich das Tal stark verengte, oder wo Abflusshindernisse, wie Brücken u. dgl. vorhanden waren.

Aus den eingemessenen Wasserständen wurden mit Hilfe der extrapolierten Pegelkurven näherungsweise die Abflussmengen Q für das gesamte Möhne- und Ruhrtal ermittelt. Das Ergebnis ist in Kurve 5 von Bild 7 dargestellt. Darnach hat sich die Hochwasserwelle verhältnismässig schnell verflacht. Von dem ursprünglichen Wert $Q = 8800$ m³/s waren nach rd. 150 km Laufstrecke bei der Mündung der Ruhr in den Rhein noch 1840 m³/s geblieben. Von diesem Wert entfallen 740 m³/s auf die normale Wasserführung der Ruhr, während 1100 m³/s zu Lasten des Hochwassers gehen — ein Betrag, der sich aus Pegelbeobachtungen am Rhein unterhalb der Ruhrmündung bei Duisburg ergeben hatte.

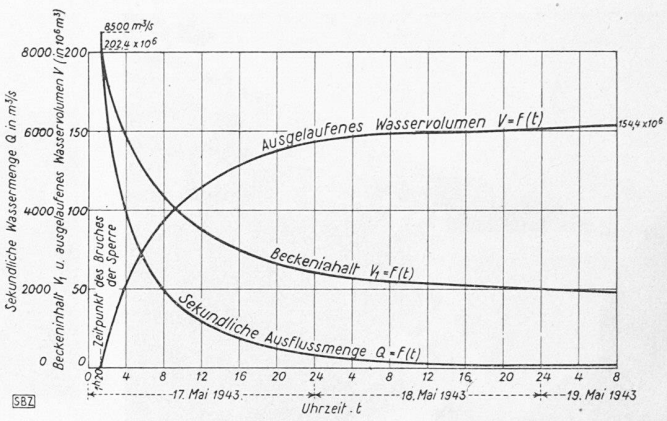

Bild 8. Ausfluss aus dem Staubecken der Edertalsperre

III. Ablauf der Hochwasserwelle aus der Eder-Talsperre

Die Vorgänge beim Bruch der Eder-Talsperre sind in Bild 8 nach den Ermittlungen der Wasserstrassendirektion Hannover zusammengestellt. Es ergibt sich im wesentlichen das selbe Bild wie bei der Möhne-Talsperre; insbesondere weichen die Höchstwerte der aus den beiden Sperren ausgeflossenen Wassermengen nur wenig voneinander ab (Möhne-Talsperre $Q_{max} = 8800$ m³/s, Eder-Talsperre $Q_{max} = 8500$ m³/s). Ein grösserer Unterschied ergibt sich jedoch hinsichtlich der Dauer: Während der Inhalt der Möhne-Talsperre im wesentlichen innerhalb von 12 Stunden ausgeflossen war, dauerte der Ausfluss für die 1,4 mal grössere Wassermenge der Eder-Talsperre dank der kleineren Sprenglücke rd. 48 Stunden. Bild 9 zeigt den Abfluss der durch den Bruch der Eder-Talsperre entstandenen Hochwasserwelle im Eder-, Fulda- und Wesertal. Die Welle war schnell verflacht, weil das Wasser genügend Gelegenheit zu Ausuferungen hatte. Schon nach 75 km Lauflänge sind die Werte des höchsten bekannten Hochwassers (Januar 1841) unterschritten. Am Pegel Intschede bei Bremen (425,6 km von der Talsperre entfernt) ist die Wassermenge auf 665 m³/s gesunken und rd. 58 Mio m³, d. i. $^1/_3$ der aus der Talsperre ausgelaufenen Menge, sind bis dorthin im Ueberschwemmungsgelände zurückgehalten worden.

Auch die Schnelligkeit der Hochwelle erwies sich hier kleiner als bei der Möhne-Talsperre.

Diese Rechnungswerte wurden im August 1946 dadurch überprüft, dass man aus der wieder hergestellten Eder-Talsperre einige künstliche Hochwasserwellen abgab und deren Fortschreiten beobachtete. Für die 94,4 km lange Strecke zwischen Talsperre und Hannoverisch-Münden wurden dabei

Tabelle 3. Schnelligkeit von Kopf und Scheitel der Sturzwelle der Eder-Talsperre in m/s

Stelle	Sperre	bei Bremen
Wellenkopf	2,39	1,22
Wellenscheitel	1,28	1,08

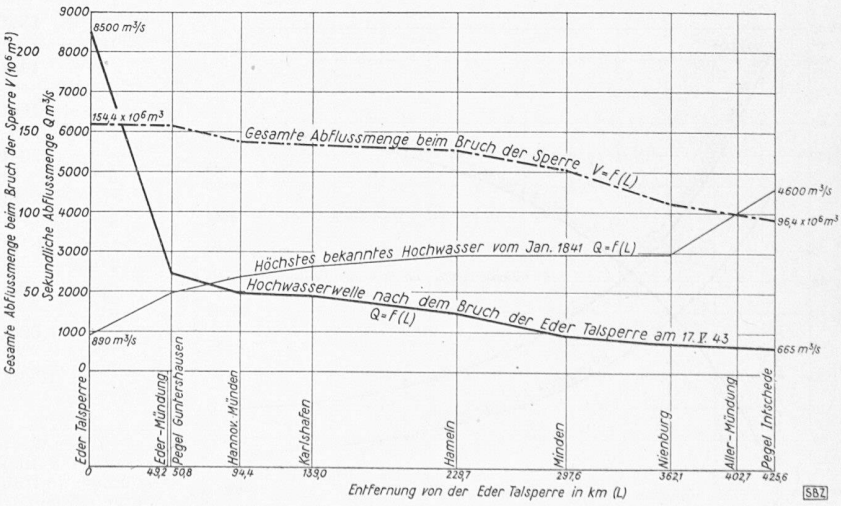

Bild 9. Hochwasserwelle beim Bruch der Edertalsperre in der Eder, Fulda und Weser

für den Beginn des Steigens eine gemittelte Schnelligkeit von 2,00 m/s und für den Durchgang des Wellenscheitels eine solche von 1,31 m/s festgestellt, also Werte, die mit denen der Tabelle 3 genügend übereinstimmen.

Eine der notwendigsten, einfachsten und billigsten Sicherheitsmassnahmen gegen die Folgen des Bruches einer Talsperre besteht darin, dass man Hochwasserstösse aus der Sperre ablässt und deren Abfluss genau registriert. Man bekommt auf diese Weise nicht nur einen Einblick in die Schnelligkeit, mit der sich der Vorgang im Ernstfall abspielen wird, sondern erkennt auch die möglichen Gefahrenstellen, kann beizeiten einen Sicherheitsplan aufstellen und vorbeugende Massnahmen treffen.

(Schluss folgt)

Ueber die Knickgefahr schraubenförmig gewundener Druckfedern

DK 621—272.2

Von Dipl. Ing. A. LEYER, Burgdorf

[*Vorbemerkung der Redaktion.* Obschon das Problem des Ausknickens von Schraubenfedern unter Druck schon verschiedentlich[1]) behandelt worden ist, dürfte mit der Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit manchem unserer Leser gedient sein.]

Druckfedern haben die unangenehme Eigenschaft, von einer gewissen Länge an unter Belastung auszuknicken. Sie sind dann unbrauchbar, weshalb die Frage interessiert, wann dies geschieht. Eine Schraubenfeder kann als elastischer Druckstab mit gerader Axe aufgefasst werden, der sich nach der Eulerschen Knickformel

$$P_K = \frac{\pi^2}{l_0^2} J E$$

berechnen lässt. Hierin muss als Trägheitsmoment dasjenige eines Stabes eingesetzt werden, der bei gleicher Biegungsbeanspruchung die selbe Krümmung erfährt wie die Federaxe, während für die freie Knicklänge l_0 jene Länge der Feder zu wählen ist, die sie im Moment des Knickens, gemessen zwischen zwei Wendepunkten der elastischen Linie, aufweist.

Bild 1 zeigt eine derartige Feder im ausgeknickten Zustand. Ihre Krümmung an irgendeiner Stelle kann aus der Deformation einer einzelnen Windung an dieser Stelle leicht berechnet werden. Bild 2 zeigt eine solche Windung, wobei der einfacheren Rechnung halber angenommen sei, dass sich die Endquerschnitte gerade in der Biegungsebene befinden. Als Mass für die Krümmung der Federaxe dient die gegenseitige Verdrehung $\Delta\varphi$ der beiden Endquerschnitte dieser Windung, denn es ist $1/\varrho = \Delta\varphi/t$, wo t den mittleren Windungsabstand bedeutet, der sich aus Drahtstärke d und Spiel s zwischen den Windungen zusammensetzt. Der Winkel $\Delta\varphi$ lässt sich nach dem Satz von Castigliano

$$\Delta\varphi = \frac{\partial A}{\partial M}$$

berechnen, worin A die vom Biegemoment M geleistete Deformationsarbeit bedeutet. Sie wird durch Integration aus der Elementararbeit ermittelt, die vom Moment M an einem Windungsteilchen nach Bild 3 verrichtet wird. Das in den oberen Endquerschnitt der Windung eingeleitete Moment M ist dort als Vektor am einen Ende des Federteilchens eingezeichnet, wohin es durch das angrenzende Drahtstück herangebracht wird. Hier wirkt dieses Moment zum Teil verbiegend, zum Teil verdrehend auf das Teilchen, nämlich mit seinen Komponenten $M \sin\alpha$ und $M \cos\alpha$. Jede dieser Komponenten verursacht im Drahtelement eine Deformationsarbeit, die erste von der Grösse

$$d A_b = \frac{M^2 \sin^2\alpha\, r\, d\alpha}{2 J_{\ddot{a}} E}$$

und die zweite von der Grösse

$$d A_t = \frac{M^2 \cos^2\alpha\, r\, d\alpha}{2 J_p G}$$

Wenn dabei anstatt mit einer schraubenförmigen Windung mit einem in der Zeichnungsebene liegenden Ring gerechnet wurde, so ist das eine Vereinfachung, die die Genauigkeit des Ergebnisses wenig beeinflusst, die Rechnung aber bedeutend erleichtert.

Aus diesen beiden Ausdrücken findet man die in der ganzen Feder investierte Deformationsarbeit durch Integration über die ganze Windungslänge und Addition der beiden Integrale zu:

$$A = \int_0^{2\pi} \frac{M^2 \sin^2\alpha\, r\, d\alpha}{2 J_{\ddot{a}} E} + \int_0^{2\pi} \frac{M^2 \cos^2\alpha\, r\, d\alpha}{2 J_p G} = \frac{\pi M^2 r}{2}\left(\frac{1}{J_{\ddot{a}} E} + \frac{1}{J_p G}\right).$$

Beschränken wir uns auf den weitaus häufigsten Fall der Stahlfeder mit rundem Drahtquerschnitt, so muss für $E = 2{,}6\,G$ und $J_{\ddot{a}} = J_p/2$ gesetzt werden, woraus folgt

$$A = \frac{\pi M^2 r}{2 J_p G}\left(\frac{2}{2{,}6} + 1\right) = \frac{1{,}77\,\pi M^2 r}{2 J_p G}$$

Um die relative Verdrehung $\Delta\varphi$ der beiden Endquerschnitte der einen Windung zu erhalten, haben wir nach Castigliano diese Arbeit partiell nach M abzuleiten. Dies ergibt

$$\Delta\varphi = \frac{1{,}77\,\pi M r}{J_p G}$$

Darnach erfährt die Feder an der betreffenden Stelle eine Krümmung von

$$\frac{1}{\varrho} = \frac{\Delta\varphi}{d+s} = \frac{1{,}77\,\pi M r}{J_p G (d+s)}$$

Beim Stab, den man sich an Stelle der Feder zu denken hat, berechnet sich die Krümmung nach der Formel

$$\frac{1}{\varrho} = \frac{M}{J E}$$

wo nun J das Trägheitsmoment bedeutet, das man in der Eulerschen Formel einzusetzen hat. Wir setzen diese Krümmungen einander gleich

$$\frac{1{,}77\,\pi M r}{J_p G (d+s)} = \frac{M}{J E}$$

lösen nach J auf und setzen den gefundenen Wert in der Eulerschen Formel ein, so wird

$$P_k = \frac{\pi J_p G (d+s)}{1{,}77\, l_0^2 r}$$

Zwischen den Grössen P_k und l_0 besteht aber noch ein anderer Zusammenhang, denn die Federlänge l_0, die im Moment des Knickens vorliegt, hängt natürlich von der Belastung P_k in diesem Moment ab. l_0 findet sich aus der Länge l_u der ungespannten Feder durch Abzug der bis zum Knikken erfolgten Einsendung f_k, die sich mit Hilfe der Feder-

[1]) *A. Stodola*: Z. VDI Band 43 (1899), S. 577; *Hurlbrink, E.*: Berechnung zylindrischer Druckfedern auf Sicherheit gegen seitliches Ausknicken. Z.VDI 54 (1910), S. 133 und 181; *Grammel, R.*: Die Knikkung von Schraubenfedern. Z. ang. Math. Mech. 4 (1924), S. 384 bis 389; *Biezeno, C. R.* und *J. J. Koch*: Knickung von Schraubenfedern. Z. ang. Math. Mech. 5 (1925), S. 379/380.

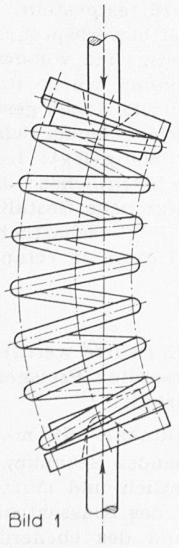

Bild 1

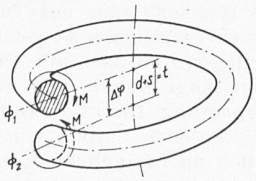

Bild 2

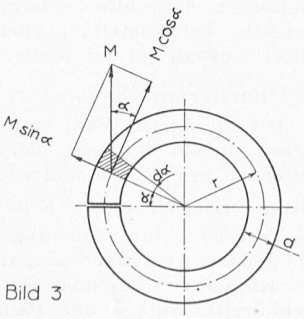

Bild 3