

Abteilung I-Binnenschifffahrt

Thema 3

Planung von Wasserstraßen für Kräfteerzeugung und Schifffahrt

Berichtersteller: Dr.-Ing. Friedrich Bassler, o. Professor für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Hochschule Darmstadt; Dipl.-Ing. Dr. Leopold Bauer, a. o. Professor, Mitglied des Vorstands der Donaukraftwerk Jochenstein AG, Passau; Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h. Heinz Fuchs, Mitglied des Vorstands der Rhein-Main-Donau AG München; Dr.-Ing. Wilhelm Gehrig, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe; Dr.-Ing. Jochen Müller, Oberregierungsbaurat, Duisburg-Ruhrorter Häfen AG Duisburg; Dipl.-Ing. Hans Stauder, Ltd. Regierungsbaudirektor, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

Thema des Berichts: **Pumpspeicherkraftwerke an schiffbaren Wasserstraßen**

Zusammenfassung

Die Mitbenutzung der Stauhaltung eines schiffbaren Flusses als unteres Becken eines Pumpspeicherkraftwerks hat den Vorteil, daß dessen Anlagekosten durch den Wegfall eines künstlich herzustellenden Staubeckens geringer werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß die das Flußtal begleitenden Höhenzüge die Anlage eines Oberbeckens gestatten, das in der Horizontalen möglichst nahe und in der Vertikalen möglichst hoch über der Stauhaltung liegt. Die Stauhaltung selbst muß geräumig genug sein, um darin die für die Pumpspeicherung erforderliche tägliche Pendelwassermenge bewirtschaften zu können.

Die meisten der für die Pumpspeicherung in Betracht kommenden Wasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland sind bereits als Kraftwasserstraßen ausgebaut, d. h. jede Staustufe ist mit einer Schifffahrtsschleuse und einem Laufwasser-Kraftwerk ausgerüstet. Bei der nachträglichen Eingliederung eines Pumpspeicher-Kraftwerks in dieses System einer Stauregelung ist davon auszugehen, daß die als Speichervolumen nutzbare Bewirtschaftungsamplitude durch die nach Länge und Tiefe gegebene Stauhaltung weitgehend festgelegt ist. Es muß also versucht werden, eine Synthese zu finden zwischen den Bedürfnissen der Schifffahrt und den erweiterten Anforderungen der Elektrizitätswirtschaft.

Nachdem die Möglichkeiten für den Bau weiterer Laufwasserkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland teils erschöpft sind, teils aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr wahrgenommen werden, ergibt sich die Notwendigkeit, die Stufenpläne für den kombinierten Ausbau und Umbau von Wasserstraßen unter dem Gesichtspunkt der Pumpspeicherung neu zu überdenken. Aus Gründen der Kostenbeteiligung am gemischten Ausbau einer Wasserstraße ist der energiewirtschaftliche Partner Pumpspeicherung daher von besonderer Bedeutung. Die im Zuge der Verdopplung des Elektrizitätsbedarfs innerhalb von 10 Jahren erforderliche Leistung eines für den überregionalen Verbundbetrieb geeigneten Pumpspeicherkraftwerks von mindestens 700 MW ist jedoch so hoch, daß ihrer Verwirklichung unter Mitbenutzung der Stauhaltung einer bereits ausgebauten Wasserstraße von Natur aus Grenzen gesetzt sind.

Die Kraftnutzung von Stauhaltungen einer Wasserstraße als Unterbecken für die Pumpspeicherung wird aber nicht nur durch das verfügbare Speichervolumen begrenzt, sondern auch durch die Sicherheitsforderungen des Schiffsverkehrs. Beeinträchtigungen können dadurch entstehen, daß aus der Stauhaltung Wasser entnommen und ihr mit großer Geschwindigkeit konzentriert zurückgegeben wird. Die Folgen dieses relativ kurzfristigen,

vom elektrizitätswirtschaftlichen Tageszyklus bestimmten Umwälzbetriebs auf den Schiffahrtsbetrieb bei fahrendem und ruhendem Verkehr sind Veränderungen der Fahrwasserhältnisse in der Unterbecken-Stauhaltung und stromab davon bis zum freien Fluß. Eine besondere Rolle spielen dabei die Wasserspiegellagen und die Strömungsverhältnisse. Hydraulische Modellversuche zu ihrer Erfassung sind dabei unerlässlich, jedoch entgegen der dabei zugrunde zu legenden Richtwerte zum Schutz der Schifffahrt noch einer wissenschaftlich fundierten Begründung.

Sofern durch eine vom Pumpspeicherbetrieb verursachte Veränderung der Fahrwasserhältnisse nachteilige Auswirkungen auf die Sicherheit des Schiffsverkehrs zu erwarten sind, ist ihnen durch bauliche Maßnahmen und betriebliche Einschränkungen zu begegnen. Besonderes Gewicht ist auf die Lage des Verbindungsbauwerks zur Stauhaltung und seine bauliche Gestaltung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Fahrrinne zu legen. Zur Strömungsablenkung und Energieumwandlung kommen Sperrkörper, Leitwände, Schlitzwände oder Sohlschwelle allein oder in Verbundbauweise in Betracht.

Mit einigen wenigen Pumpspeicherkraftwerken, die unter Wahrung der Schifffahrtsinteressen großräumige Stauhaltungen optimal als Unterbecken nutzen, kann aus einer Wasserstraße im Vergleich mit einer Vielzahl von Laufkraftwerken quantitativ und qualitativ das Vielfache an hochwertiger Energie gewonnen werden.

Inhalt

	Seite
1. Wasserstraßen für Krafterzeugung und Schifffahrt	59
2. Örtliche Voraussetzungen der Pumpspeicherung	64
2.1. Stauregelung und Pumpspeicherung	64
2.2. Topographie des Flußtales	65
2.3. Hydrologie des Flußlaufes	65
2.3.1. Bewirtschaftung von Stauhaltungen	66
2.3.2. Entnahme aus dem natürlichen Abfluß	67
3. Forderungen der Elektrizitätswirtschaft an die Wasserstraße	69
3.1. Bemessung von Unterbecken	69
3.2. Entwicklungstendenzen der Pumpspeicherung	69
4. Begrenzung der Kraftnutzung an Wasserstraßen durch den Schiffsverkehr	72
4.1. Verkehrssicherheit der Schifffahrt	72
4.2. Fahrwasserhältnisse im Unterbecken	72
4.2.1. Wasserspiegellage	72
4.2.2. Strömungsverhältnisse	77
4.3. Fahrwasserhältnisse stromab vom Unterbecken	78
4.3.1. Stauhaltungen	78
4.3.2. Freier Fluß	80
5. Bauliche Gestaltung des Verbindungsbauwerks	80
5.1. Lage zur Stauhaltung	81
5.2. Unmittelbare Verbindung mit der Stauhaltung	81
5.3. Verbindungskanal zur Stauhaltung	83

	Seite
6. Projektierungsperspektiven für die Pumpspeicherung an Wasserstraßen	84
6.1. Wasserstraßen mit Laufkraftwerken	84
6.2. Ausweidlösungen	85
6.3. Wasserstraßen ohne Laufkraftwerke	85
7. Schrifttumsverzeichnis	87

1. Wasserstraßen für Krafterzeugung und Schifffahrt

Das Ziel des Ausbaues größerer Flüsse und Ströme durch eine Stauregelung war seit Jahrzehnten ihre Doppelnutzung als Verkehrs- und Energieträger. Den verschiedenartigen Bedürfnissen dieser Wassernutzer entsprechend richtete sich das Interesse an einem gemischten Stufenausbau als Kraftwasserstraße in der Bundesrepublik Deutschland vornehmlich nach der Abflußcharakteristik der Wasserläufe. An Flüssen mit stark unausgeglichener Wasserführung wie Neckar, Main und Mosel ging die Initiative meist von der Schifffahrt aus, während Ströme mit ausgeglichenerem Regime wie Rhein und Donau in erster Linie zur Energieausbeute anregten. Die Einbeziehung anderer wasserwirtschaftlicher Zielsetzungen (z. B. der Schutz gegen Erosionen im Flußbett) kam der optimalen Lösung einer Stauregelung entgegen.

Bei dieser Art von Mehrzwecknutzung fließt das natürliche Wasserdargebot unverändert und in der Regel ohne Unterbrechung als Kraftwasser, Schleusungswasser und Überwasser von Staustufe zu Staustufe. Die einzelnen Nutzungen beeinträchtigen sich im allgemeinen nicht. Die dabei 24stündig anfallende Laufwasserenergie dient wie die thermische Energie zur Deckung des Grundlastbedarfs (Abb. 1). Sie wird dementsprechend niedrig bewertet, zumal sie den Schwankungen des natürlichen Zuflusses unterliegt. Der Wert der Laufwasserenergie einer Kraftwerkskette kann auf dem Wege des Schwellbetriebs erhöht werden, indem der in Schwachlaststunden anfallende natürliche Zufluß in der obersten, entsprechend größer auszulegenden Stauhaltung zurückgehalten und erst bei größerem Bedarf zusammen mit dem frei zufließenden Wasser verarbeitet wird. Doch sind dieser Methode der Energieveredelung wegen der unvermeidlichen zeitlichen Unständigkeit und auch im Hinblick auf die Sicherheit des Schiffsverkehrs Grenzen gesetzt.

Nachdem die Zahl der ausbauwürdigen Kraftwasserstraßen in der Bundesrepublik Deutschland bald erschöpft sein wird und es mit dem Vordringen der Kernenergie möglich geworden ist, den Grundlastbedarf in thermischen Kraftwerken billiger (und beständiger) zu decken als auf hydraulischem Wege, verlieren die Laufwasserwerke als Partner an multifunktionalen Flußbaumaßnahmen künftig an Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Flüsse mit starken Zuflußschwankungen, so daß die Schifffahrt, die diesem Mangel allein mit einer Stauregelung begegnen kann, in Zukunft auf eine Kostenbeteiligung der Energiewirtschaft an dieser außerverkehrlichen Funktion verzichten muß. Allenfalls kann die Mitbenutzung von der Schifffahrt dienenden Stauhaltungen für Kühlwasserzwecke von Wärmekraftwerken in Betracht kommen. Während sich der prozentuale Anteil der Laufwasserkraft an der Bedarfsdeckung eines Verbundnetzes somit allmählich rückläufig bewegt, weist der Anteil der Pumpspeicherenergie eine stark zunehmende Tendenz auf. Denn auf dem Wege der hydraulischen Akkumulierung ist es umweltschonend möglich, eine vollkommene Veredelung der in der Bundesrepublik Deutschland verfügbaren Schwachlastenergie aus thermischen oder hydroelektrischen Kraftwerken in höchstwertigen Tagesspitzenstrom zu erreichen. Je größer die Maschineneinheiten der thermischen Werke werden, um so bedeutsamer ist die schnelle Einsatzbereitschaft von Pumpspeichern, um bei Störungen im elektrischen Verbundnetz die Energieversorgung kurzfristig sicherzustellen.

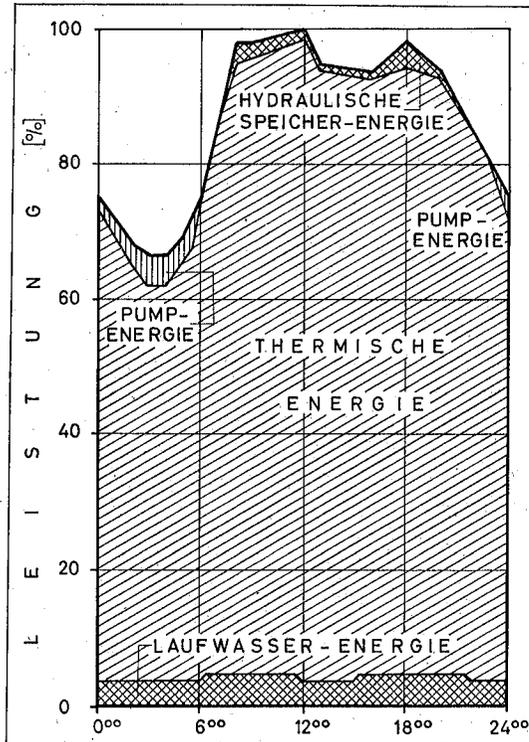


Abb. 1: Prozentuale Tagesbelastung
der Kraftwerke der Bundesrepublik Deutschland
am 16. 12. 1970

Von den beiden für die Pumpspeicherung erforderlichen Sammelbecken ist das untere mit der Wasserwirtschaft einer Tallandschaft am engsten verknüpft, dient es doch nicht nur als Auffangbecken für das in den Turbinen abgearbeitete Betriebswasser, sondern auch als Speisungsreservoir und zum Verlustausgleich für das von den Pumpen in das obere Becken zu fördernde Speicherwasser. Im allgemeinen werden die beiden Becken eines Pumpspeicherkraftwerks künstlich angelegt. Je nach den gegebenen Verhältnissen kann das Unterbecken aber auch in oder neben einem gestauten oder freifließenden natürlichen Gewässer angeordnet werden. Gegenüber dem ungestauten Fluß hat eine Stauhaltung den Vorteil, daß der Wasserstand nicht allzu stark schwankt und damit übermäßige Änderungen des Zulaufdrucks vermieden werden. Im Sinne einer wasserwirtschaftlichen Mehrzwecknutzung ist die Stauhaltung eines schiffbaren Flusses als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks besonders geeignet. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Doppelfunktion einer Stauregelung als Verkehrs- und Energieträger, die mit der Einschränkung des Ausbaues weiterer Laufwasserkräfte nicht mehr gegeben sein wird, unter anderen Voraussetzungen teilweise wiederherzustellen. Selbstverständlich schließt die Verwendung einer bestehenden Stauhaltung als Pumpspeicherbecken die Beibehaltung von unterhalb vorhandenen Laufwasserkraftwerken nicht aus; denn diese können in Schwachlaststunden ebenfalls als Pumpstromlieferanten dienen und beim Vorhandensein einer geschlossenen Kaskade das in Starklastzeiten abgearbeitete Turbinenwasser des Pumpspeicherwerks im gleichen Takt (Kippbetrieb) spitzenbedarfsgerecht nut-

zen. Im Gegensatz zur Laufwasserkrafterzeugung erfordert der Pumpspeicherbetrieb jedoch Eingriffe in den Abfluß des natürlichen Wasserdargebots, so daß sich Auswirkungen auf die Schifffahrt kaum vermeiden lassen.

Von der Möglichkeit der gleichzeitigen Nutzung von Wasserstraßen als Unterbecken für die Pumpspeicherung wurde noch relativ selten Gebrauch gemacht. In der Bundesrepublik Deutschland, dem Land mit den ersten und meisten Pumpspeicherkraftwerken, bestehen seit mehreren Jahren am Hochrhein und an der Elbe drei leistungsstarke Anlagen dieser Art. Weitere Pumpspeicherkraftwerke sind an den Wasserstraßen Mosel, Donau, Mittelrhein und Neckar geplant, ebenso eine Erweiterung der bestehenden Anlage an der Elbe. Der Standort aller in der Bundesrepublik Deutschland vorhandenen und projektierten größeren Pumpspeicherkraftwerke ist aus Abb. 2 ersichtlich.

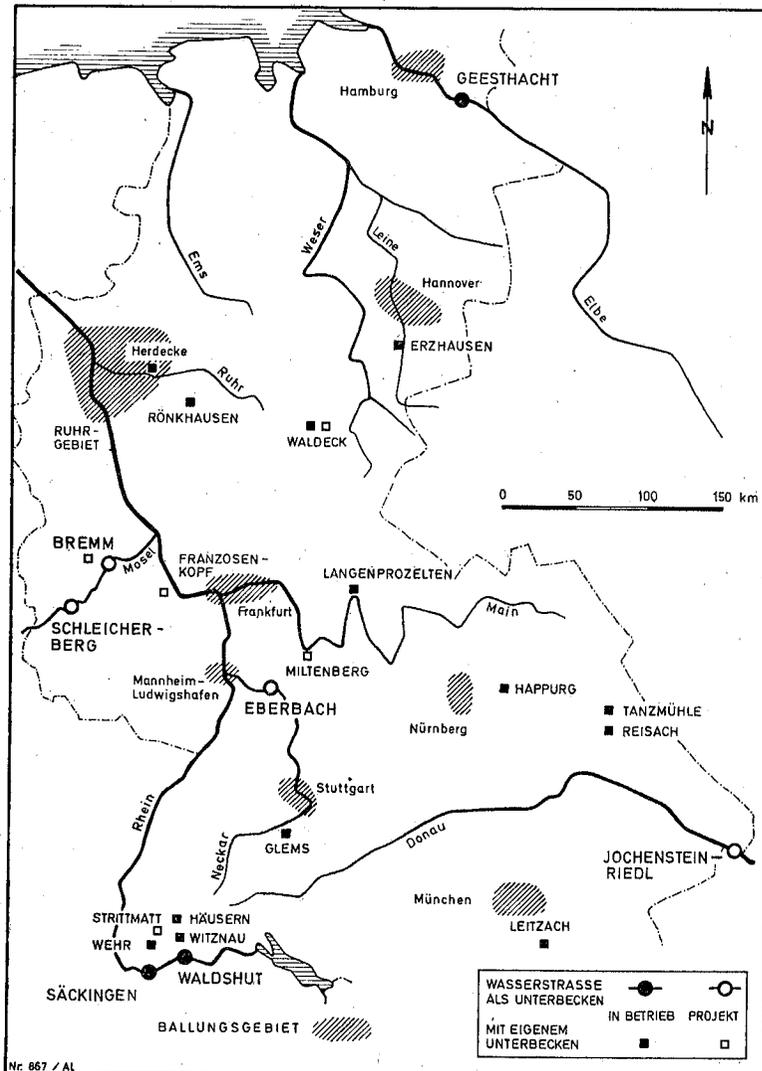


Abb. 2: Standorte der größeren Pumpspeicherkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland

WASSERSTRASSE		Rhein *)	Elbe	Rhein *)	Mosel	Mosel	Donau
Pegel	—	Rhein-felden	Geest-hacht	Rhein-felden	Cochem	Cochem	Dantel-bach-Mündung
Niederschlags- gebiet	km ²	34 550	134 700	34 550	27 100	27 100	77 052
Niedr. Niedrig- wasserabfluß	m ³ /s	267	128	267	25	25	360
Mittl. Niedrig- wasserabfluß	m ³ /s	451	275	451	59	59	591'
Mittl. Abfluß	m ³ /s	1 006	736	1 006	288	288	1 420
Höchst. schiffb. Abfluß	m ³ /s	2 430	1 200	2 430	1 380	1 380	3 600
Mittl. Hoch- wasserabfluß	m ³ /s	2 540	1 900	2 540	1 900	1 900	4 200
Höchster Hoch- wasserabfluß	m ³ /s	4 200	3 840	4 200	4 100	4 100	9 300
STAUHALTUNG		Albrück/ Dogern	Geest- hacht	Säckin- gen/ Ryburg- Schwör- stadt	Trier/ Fankel/ Koblenz	Trier/ Detzem/ Wintrich	Aschach
Speichervolumen	hm ³	1,0	—	1,9	2,0	3,6	5,3
Länge	km	9,7	38,6	7,2/ 14,4	17,0/ 18,9/ 18,9	17,0/ 29,3/ 26,4	40,7
Amplitude am Wehr	cm	50	—	70/40	60/0/60	60/60/60	50
PUMPSPEICHER- KRAFTWERK		Walds- hut	Geest- hacht	Säckin- gen.	Bremm (Unter- werk)	Schlei- cher- berg	Jochen- stein/ Riedl
Horiz. Abstand der Becken L	m	9 630	580	2 185	800	1 330	840
Fallhöhe H	m	160	83	411	106	350	330
L : H	—	60	7,0	5,3	7,5	3,8	2,5
Turbinen- durchfluß	m ³ /s	140	189	96	120	224	250
Pumpenförderung	m ³ /s	40	117	64	120	192	210
Entnahme aus natürl. Abfluß	m ³ /s	40	117	64	60	60	210
	% **)	9	43	14	100	100	35
Generatoren- Leistung	MW	176	105	360	140	700	700
Inbetriebnahme		1953	1957	1967	Projekt	Projekt	Projekt

*) zwischen Rheinfelden und Bodensee noch nicht schiffbar
 **) des mittleren Niedrigwasserabflusses

In den folgenden Ausführungen wird auf je drei bestehende und drei geplante Pumpspeicherkraftwerke an bundesdeutschen Flüssen und Strömen Bezug genommen, und zwar

Waldshut	am Hochrhein	seit 1953
Geesthacht	an der Elbe	seit 1957
Säckingen	am Hochrhein	seit 1965
Bremm	an der Mosel	Projekt
Schleicherberg	an der Mosel	Projekt
Jochenstein-Riedl	an der Donau	Projekt.

Die Kenndaten dieser Werke sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Ihre Anordnung im Grundriß geht aus Abb. 3 hervor. Von zwei Anlagen liegen die Ergebnisse

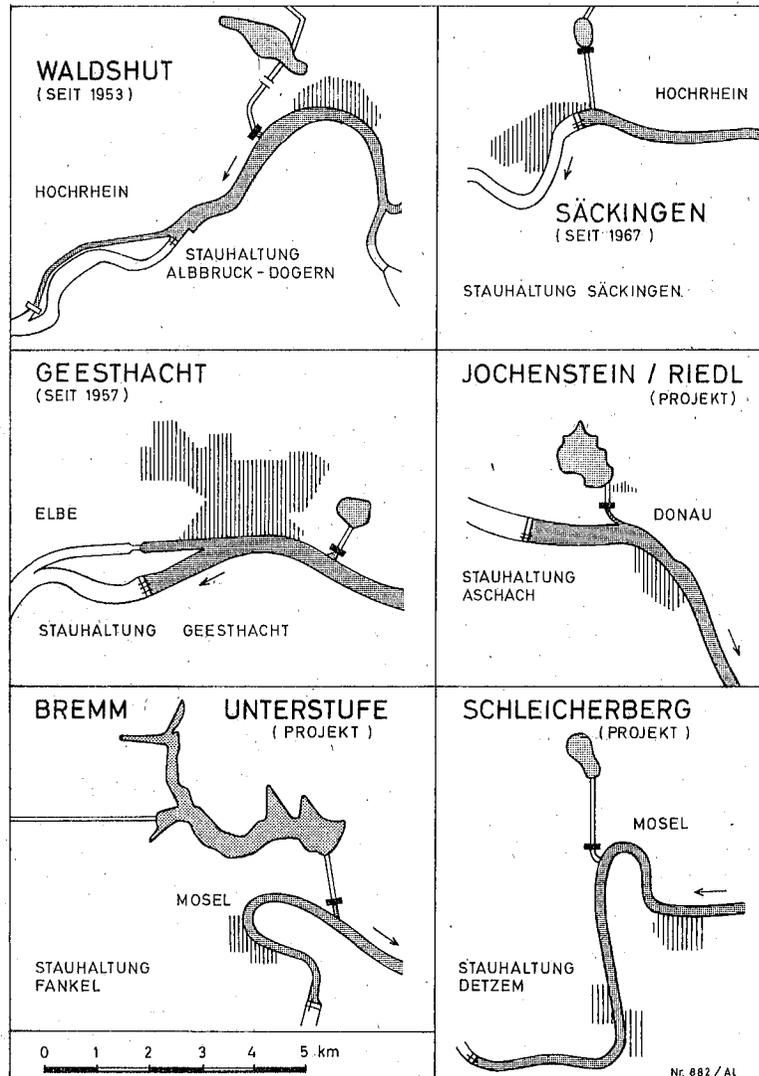


Abb. 3: Übersichtslageplan von 3 bestehenden und 3 geplanten Pumpspeicherkraftwerken an Wasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland

umfangreicher wasserbaulicher Modellversuche vor. Der vorliegende Beitrag stützt sich weitgehend auf die bei diesen sechs Objekten gewonnenen Erkenntnisse, Untersuchungsergebnisse und Betriebserfahrungen der beteiligten Berichtersteller.

2. Örtliche Voraussetzungen der Pumpspeicherung

Die Eignung von Stauhaltungen einer schiffbaren Wasserstraße als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks hängt in erster Linie von den durch die Stauregelung geschaffenen Voraussetzungen sowie von den sonstigen topographischen und hydrologischen Gegebenheiten des Flußtales ab. Zwecks Einschränkung der Übertragungsverluste wird man zunächst versuchen, die Entfernung des Pumpspeicherwerks sowohl zum Verbrauchsschwerpunkt als auch zum Pumpstromlieferanten durch Auswahl der hierzu am günstigsten gelegenen Stauhaltung so gering wie möglich zu halten.

2.1. Stauregelung und Pumpspeicherung

Die Problematik der nachträglichen Eingliederung der Pumpspeicherung in die Stauregelung eines Flusses ist darin zu sehen, daß dem ursprünglichen Ausbau eine andere Zielsetzung zugrundelag. Dies ist an der Entwicklung der Stauregelung in Deutschland deutlich zu erkennen. Als ihre Vorläufer sind die großen Laufwasserkraftwerke anzusehen, wie sie seit der Jahrhundertwende am Hochrhein und an der Donau errichtet wurden. Allein maßgebend für ihren Standort waren größtmögliche Fallhöhen. An den Staustufen des Hochrheins wurden zwar Vorkehrungen für eine spätere Großschiffahrt getroffen, doch blieb es zunächst bei einer lückenhaften Anordnung der Stauhaltungen [4].

Mit der zunehmenden Bedeutung des Schiffsverkehrs begann man in den 20er Jahren, zunächst an den nur bedingt schiffbaren Flüssen in Anlehnung an die topographischen Gegebenheiten Stufenpläne für einen gemischten Ausbau als Kraftwasserstraße aufzustellen und damit die Lage und Länge der Stauhaltungen festzulegen. Die dabei im Interesse von Schiffahrt und Energiewirtschaft zu berücksichtigenden Forderungen an eine Stauregelung erwiesen sich als weitgehend konform: Hohe Stufen verringerten die Zahl der Schleusen (Zeitersparnis) und der Laufwasserkraftwerke (Leistungskonzentration). An gleichlangen Stauhaltungen war besonders die Schiffahrt interessiert, um den Durchgangsverkehr nicht aufzuhalten. Gleiche Fallhöhen erleichterten die Standardisierung der maschinellen und elektrischen Ausrüstung von Kraftwerken und Schleusen. Unter diesen Gesichtspunkten wurden die Stauregelungen an den Wasserstraßen Neckar (ab 1920), Main oberhalb Aschaffenburg (ab 1921), Donau (ab 1925), Hochrhein (ab 1927) und Oberrhein (ab 1930) als Gemeinschaftsvorhaben der Verkehrs- und Energieträger systematisch begonnen und größtenteils fertiggestellt.

Als die Elektrizitätswirtschaft begann, die inzwischen bewährte Pumpspeicherung systematisch auf dafür geeignete Wasserstraßen auszudehnen und diese als Unterbecken zu benutzen, wurden in den 30er Jahren die ersten Rahmenpläne für derartige Pumpspeicherkraftwerke erarbeitet. Dabei sollte wie z. B. am Main zunächst nur die aus der Wasserstraße selbst anfallende überschüssige Laufenergie als Pumpenergie verwendet werden [16]. Es zeigte sich jedoch, daß die in den Stauhaltungen zulässigen Spiegelschwankungen nur bescheidene Speichervolumina für die Unterbecken ermöglichten. Noch schwieriger wurde die Situation nach dem Zweiten Weltkrieg, als angestrebt wurde, nicht nur die Eigenproduktion der Laufkraftwerke an den Wasserstraßen zu Spitzenstrom zu veredeln, sondern auch Fremdstrom, so daß noch größere Pendelwassermengen in den Stauhaltungen untergebracht werden sollten. Dies führte 1953 erstmalig am Hochrhein dazu, an einer bestehenden Stufe nachträglich eine Stauerhöhung vorzunehmen, um das erforderliche Pumpspeichervolumen in der Stauhaltung unterzubringen [1].

Am Main wurde schließlich von einer unmittelbaren Verwendung der Stauhaltungen als Unterbecken Abstand genommen. An der Mosel, deren Stauregelung oberhalb Koblenz in den Jahren 1957 bis 1964 verwirklicht wurde, sollen zwei für den Schwellbetrieb größer ausgelegte Stauhaltungen zusätzlich für den Pumpspeicherbetrieb verwendet werden [3]. An der Donau versucht man ohne Stauerhöhung auszukommen.

Eine Ausnahme von dieser konventionellen Bauweise bildet die Elbe, an der eine Staustufe erstmalig von Anfang an für Schifffahrt und Pumpspeicherung gemeinsam konzipiert wurde [2, 6].

2.2. Topographie des Flußtales

Entscheidend für den endgültigen Standort ist, daß sich die unmittelbare Umgebung der als Unterbecken zur Wahl stehenden Stauhaltung für die Anlage eines Pumpspeicherkraftwerks optimal eignet. In Betracht hierfür kommen den Fluß in unmittelbarer Nähe begleitende Höhenzüge, die Fallhöhen von mehr als 100 m ermöglichen und auf denen ein entsprechend großes Oberbecken angelegt werden kann. Bei Flachlandflüssen wie an der Elbe müssen die geringen Fallhöhen durch größere Betriebswassermengen kompensiert werden. Um ein Minimum an Bau- und Betriebskosten der Pumpspeicherung zu erreichen, ist anzustreben, vor allem folgende grundlegenden topographischen Voraussetzungen zu erfüllen (vgl. Tabelle in Abschnitt 1):

- Die Länge L der horizontalen Projektion der Verbindungsleitung zwischen der als Unterbecken vorgesehenen Stauhaltung der natürlichen Wasserstraße und dem künstlichen Oberbecken soll möglichst kurz sein.
- Die Fallhöhe H , d. h. der Höhenunterschied zwischen den Schwerpunkten der beiden Becken, soll möglichst groß sein. Dabei ist anzustreben, daß das Verhältnis $L : H$ den Wert 4 bis 6 nicht überschreitet.
- Der als Unterbecken zu nutzende Teil der Stauhaltung soll ein möglichst großes Volumen erhalten, um die nach Leistung und Arbeitsinhalt erforderliche Pendelwassermenge jederzeit aufzunehmen.
- Der Speicher soll großflächig und niedrig sein, um die Wasserstandsschwankungen im Interesse von Schifffahrt und Kraftnutzung auf ein Minimum zu begrenzen.

Die Erfüllung dieser im Prinzip für die Planung jedes Pumpspeicherkraftwerks geltenden Standortbedingungen wird bei den an eine Wasserstraße gebundenen Werken durch den Zwangspunkt Unterbecken erschwert. Trotzdem wird die Energiewirtschaft an der Mitbenutzung einer Wasserstraße als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks interessiert sein, sofern es möglich ist, die erforderliche Pendelwassermenge billiger in einer Stauhaltung unterzubringen als in einem getrennt davon zu errichtenden Unterbecken. Für die Kostenträger der Wasserstraße bedeutet die Doppelfunktion, daß sie die Kosten für eine primär in ihrem Interesse liegende Stauregelung nicht allein aufzubringen brauchen. Dabei ist es möglich, den Teilaspekt „Hydroelektrische Energieerzeugung durch Pumpspeicherung“ genau zu quantifizieren und in monetären Größen zu bewerten.

2.3. Hydrologie des Flußlaufes

Nach Klärung der geographischen Voraussetzungen des Standortes eines Pumpspeicherkraftwerks innerhalb der Stauregelungsstrecke und der hieraus resultierenden Rohfallhöhe ist zu ermitteln, in welchem Umfang die primär für Schifffahrt und Laufwasserkraft konzipierte Stauhaltung zusätzlich in Anspruch genommen werden kann, um im Umwälzbetrieb zwischen Unter- und Oberbecken Spitzenstrom zu erzeugen. Hierfür sind zwei wesentliche, hydrologisch bedingte Gesichtspunkte maßgebend:

- der Bewirtschaftungsbereich des nutzbaren Speichervolumens der Stauhaltung in Abhängigkeit vom natürlichen Abfluß, und
- die Bedingungen für die Entnahme von Wasser aus dem natürlichen Abfluß und seine Rückgabe.

Sofern die Stauhaltung einer Wasserstraße von Anfang an allein nach den Erfordernissen der Pumpspeicherung, also ohne Einbeziehung der Laufwasserkraft projektiert wird, ergeben sich dabei wesentlich einfachere Abflußbedingungen.

2.3.1 Bewirtschaftung von Stauhaltungen

Während das nutzbare Speichervolumen des Oberbeckens von den Horizontalen in Höhe des Stau- und Absenkziels begrenzt wird, sind die Begrenzungslinien des Speichervolumens in dem von einer Stauhaltung gebildeten Unterbecken vom Wehr ab ansteigende Kurven. Länge und Höhenlage der beiden Staukurven und damit das Speichervolumen ändern sich nach dem natürlichen Abfluß. Bei niedrigem Abfluß ist das Volumen größer als bei höherem Abfluß (Abb. 4).

Um die erforderliche Pendelwassermenge in der Stauregelungsstrecke einer Wasserstraße unterzubringen, gibt es unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Schifffahrt verschiedene Möglichkeiten. Es sind dies:

- Erhöhen des vorhandenen Normalstaues und Aufsetzen des Speichervolumens auf diesen.
- Tieferlegen des vorhandenen Normalstaues bis auf die zur Unterbringung des Speichervolumens erforderliche Spiegelhöhe der Stauhaltung.
- Heben und Senken des vorhandenen Normalstaues, um die für das Speichervolumen erforderliche Amplitude in der Stauhaltung zu erreichen.
- Beteiligung von oberhalb der Entnahme-Stauhaltung liegenden Stauhaltungen am Speichervolumen des Unterbeckens.
- Beteiligung der unterhalb der Entnahme-Stauhaltung liegenden Stauhaltungen am Speichervolumen des Unterbeckens.

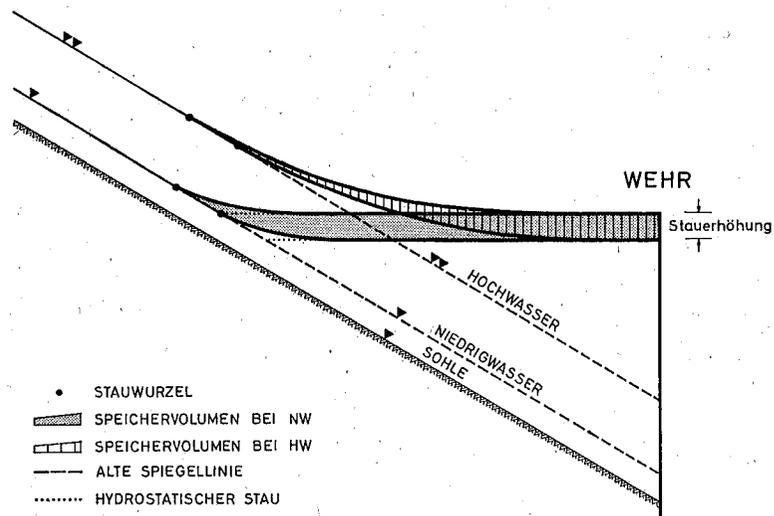


Abb. 4: Pumpspeichervolumen in einer Stauhaltung bei kleinem und großem natürlichen Abfluß

Beispiele hierfür sind in Abb. 5 dargestellt. Die Wahl einer oder mehrerer dieser Bewirtschaftungsmöglichkeiten bei gegebenen Stauhaltungsgrößen ist im wesentlichen abhängig von den energiewirtschaftlichen Forderungen hinsichtlich Leistung und Arbeit des Pumpspeicherkraftwerks sowie von den wasserwirtschaftlichen Entnahme- und Rückgaberestriktionen zugunsten von Schifffahrt und Unterlieger-Laufkraftwerken. Auf diese Bedingungen wird später näher eingegangen. In [12] wurde ein relativ einfaches Berechnungsverfahren entwickelt, das die Bewirtschaftung eines aus einer oder mehreren Stauhaltungen gebildeten Unterbeckens in Abhängigkeit vom Abfluß und den Ausbaugrößen auf dem Weg der elektronischen Datenverarbeitung ermöglicht.

2.3.2 Entnahme aus dem natürlichen Abfluß

Die Verwendung eines gestauten Flusses als Unterbecken hat gegenüber einem seitlichen Becken ohne natürlichen Zufluß den großen Vorteil, daß eine unmittelbare Verbindung des Pumpspeicherwerks mit dem Fluß besteht.

Bei einem Unterbecken mit Kurzzeitspeicherung (Tagesumwälzbetrieb) gewinnt diese Verbindung Bedeutung, wenn der volle Ausgleich des Pumpspeichervolumens infolge höherer natürlicher Abflüsse nicht mehr in der Stauhaltung allein vorgenommen werden kann und diese in Anspruch genommen werden sollen. Allerdings darf eine Entnahme aus dem natürlichen Abfluß vor allem mit Rücksicht auf die Schifffahrt im nicht gestauten Unterlauf des Flusses erst bei ausreichend hohen Wasserführungen beginnen.

Eine wesentliche Rolle spielt die Entnahme aus dem natürlichen Abfluß bei der Langzeitspeicherung, weil sie die Wasserstandsganglinie der Wasserstraße unterhalb stärker verändert als der tägliche Operationszyklus eines Pumpspeicherwerks bei Kurzzeitspeicherung. Die Notwendigkeit zur Langzeitspeicherung ergibt sich z. B. aus der fortschreitenden Tendenz einer Verlängerung des arbeitsfreien Wochenendes, die einerseits dazu zwingt, im Oberbecken größere Speichermöglichkeiten zu schaffen, die aber andererseits eine stärkere Beaufschlagung des Unterbeckens während der verkürzten Arbeitswoche zur Folge hat. In diesem Zusammenhang sei auf das an der Mosel geplante Langzeitpumpspeicherwerk Bremm hingewiesen, das in 6.2 näher behandelt wird [11].

Langzeitspeicherung ist nicht nur bei den bisher behandelten „reinen“ Pumpspeicherkraftwerken möglich, bei denen nur das künstlich in das Oberbecken geförderte Wasser genutzt wird, sondern auch bei „gemischten“ Pumpspeicherkraftwerken, die daneben das dem Oberbecken aus seinem Niederschlagsgebiet auf natürlichem Wege zufließende Wasser verarbeiten. Haben der Zubringer des natürlichen Zuflusses zum Oberbecken und der die Unterbecken-Stauhaltung speisende Fluß ein jahreszeitlich voneinander abweichendes Abflußregime, so gewinnt die saisonale Langzeitspeicherung aus dem natürlichen Abfluß eine besondere Bedeutung. Sie ist erstmalig in großem Umfang zum Ausgleich der im Spätherbst und Frühjahr stark wasserführenden Schwarzwaldflüsse und des im Sommer infolge alpiner Schmelzwässer anschwellenden Hochrheins angewandt worden. Über das Pumpspeicherkraftwerk Waldshut wird dem Hochrhein seit 20 Jahren während der täglichen Schwachlastzeiten bei höheren Abflüssen Wasser entnommen und über 3 Stufen zum Schluchseebecken hochgepumpt. Die Rückgabe dieses saisonverlagerten Abflusses bei Spitzenstrombedarf ist zum Schutz der übrigen Wassernutzer naturgemäß mit Auflagebedingungen verknüpft, die über diejenigen für die Kurzzeitspeicherung hinausgehen [5].

Am Hochrhein (Mittelwasser = $1000 \text{ m}^3/\text{s}$) ist der für die Entnahme maßgebende Abfluß auf mindestens $800 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt. Die dabei zulässige Entnahme von Rheinwasser entspricht mit 40 bzw. $64 \text{ m}^3/\text{s}$ der maximalen Pumpenförderung in den Unterstufen des

Schluchsee- bzw. Hotzenwaldwerks. Aus der Mosel (Mittelwasser = $300 \text{ m}^3/\text{s}$) darf im Hinblick auf die Schifffahrt im Rhein kein Wasser entnommen werden, solange der Rhein-Pegel Koblenz auf $1,60 \text{ m}$ ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$ Abfluß) oder niedriger steht. Nach den Planungen sollen maximal $60 \text{ m}^3/\text{s}$ Moselwasser entnommen werden, d. h. nur etwa 50% der maximalen Förderung der Speicherpumpen.

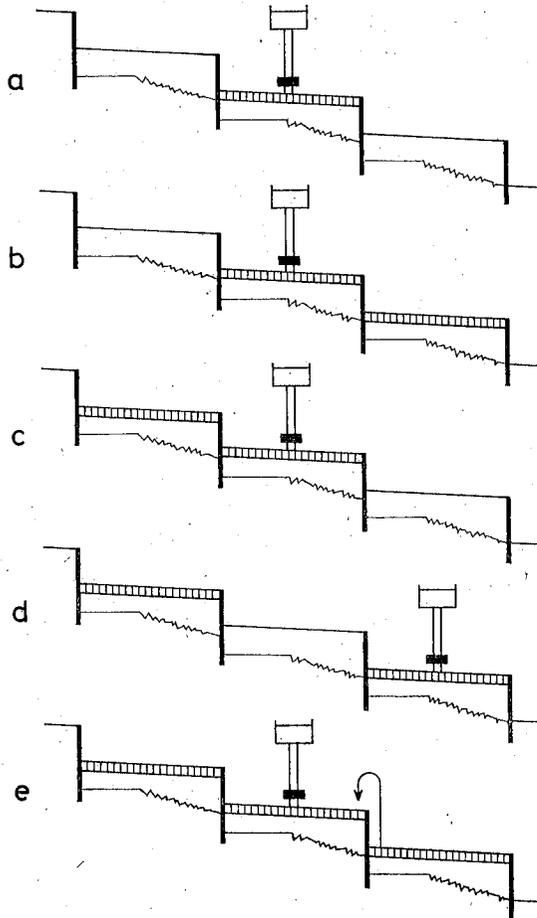


Abb. 5; Beispiele für die Bewirtschaftung von Stauhaltungen als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks

Bei der von vornherein als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks konzipierten Stauhaltung einer Wasserstraße ohne Laufkraftwerk wie bei Geesthacht kommt es nur darauf an, die für die Schifffahrt erforderliche Wassertiefe sicherzustellen, so daß der Wasserspiegel der Stauhaltung am Pumpspeicherwerk konstant gehalten werden kann. Das Pumpwasser wird der Elbe entnommen und als Turbinenwasser in diese zurückgegeben. Die dabei entstehenden Wasserstandsschwankungen in der Stauhaltung werden durch Steuerung der Wehrverschlüsse ausgeglichen. Lediglich an der untersten Haltung einer Stauregelungsstrecke ohne Laufkraftwerke sind im Hinblick auf die Schifffahrt Vorkehrungen für die Vergleichmäßigung der Wasserabgabe zu treffen.

3. Forderungen der Elektrizitätswirtschaft an die Wasserstraße

3.1. Bemessung von Unterbecken

Bei der reinen Pumpspeicherung mit Tageszyklus kommt es darauf an, das Unterbecken während der Dauer der gesicherten Verfügbarkeit von Schwachlastenergie unter vollem Einsatz aller Pumpen zu entleeren und dann die im Oberbecken angesammelte Wassermenge während der Dauer des Bedarfs an Spitzenstrom abzarbeiten und im Unterbecken zu speichern (Abb. 6). Bei gleicher Dauer von Erzeugungs- und Pumpenbetrieb haben die Turbinen und Pumpen gleiche Durchflüsse. Die Betriebszeit der Pumpenförderung in der Nacht eines normalen Arbeitstages lag bisher durchweg bei 6 bis 8 Stunden. Die Dauer des Turbinenbetriebs — von unvorhergesehenen Spitzeneinsätzen abgesehen — ist weitgehend davon abhängig, ob Vollast oder Teillast gefahren wird; sie kann deshalb zwischen 4 und 12 Stunden schwanken. Im allgemeinen wird die tägliche Pendelwassermenge schneller abgearbeitet als hochgepumpt.

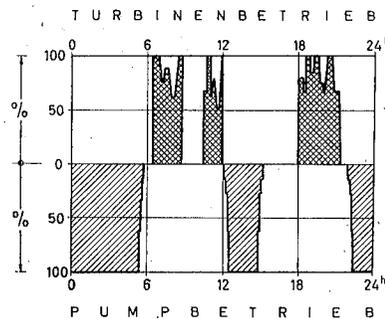


Abb. 6: Tageszyklus eines Pumpspeicherkraftwerks

Bei den bestehenden Anlagen liegt der Speicherinhalt des Unter- bzw. Oberbeckens im allgemeinen zwischen 1 und 2 Mio m³. Diese Größenordnung wurde z. B. auch den Unterbecken in den Stauhaltungen am Hochrhein zugrunde gelegt. Das 1953 in Betrieb genommene Unterbecken des Schluchseekraftwerks Waldshut (176 MW) hat 1,0 Mio m³, das 1967 fertiggestellte Unterbecken des Hotzenwaldkraftwerks Säckingen (360 MW) hat 1,9 Mio m³ Nutzinhalt. Während es bei Waldshut noch genügte, die Pendelwassermenge ausschließlich in der um 50 cm erhöhten Stauhaltung des Rheinkraftwerkes Albrück-Dogern unterzubringen (Abb. 5 a), mußten bei Säckingen zwei Stauhaltungen in Anspruch genommen werden [10]. Von der dort auf 1,9 Mio m³ vergrößerten Pendelwassermenge sind 1 Mio m³ in einer durch Heben und Senken des Normalstaus der Entnahmestauhaltung Säckingen entstehenden Amplitude von 75 cm Höhe untergebracht, während 0,9 Mio m³ auf die um 40 cm abzusenkende Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt entfallen (Abb. 5 b).

3.2. Entwicklungstendenzen der Pumpspeicherung

In den letzten Jahren hat sich in der Beurteilung der Größenordnung von Pumpspeicherkraftwerken eine Änderung vollzogen, die in der Bundesrepublik Deutschland sowohl auf das anhaltende Wirtschaftswachstum als auch auf eine anderweitige Nachtbelastung des Netzes zurückzuführen ist, und die zwangsläufig auch die Verwendungsmöglichkeiten von Flußläufen, die gleichzeitig Wasserstraßen sind, als Pumpspeicherbecken beeinflussen wird.

Das Wirtschaftswachstum hat sich zweifellos auf dem Energiesektor verstärkt ausgewirkt, weil eine verstärkte Umlagerung der Verbraucher auf die Elektrizität als Energieversorgung stattgefunden hat. Die Verdoppelung des Elektrizitätsbedarfs und der dafür erforderlichen Leistung innerhalb von 10 Jahren führt im Bereich der Grundlast zur Verwendung immer größerer Maschineneinheiten. Im Bereich des größten Energieversorgungsunternehmens der Bundesrepublik Deutschland werden in Kürze die Neubauten von thermischen 300 MW-Blöcken auslaufen und auf 600 MW-Blöcke übergehen. Das am Rhein gelegene Kernkraftwerk Biblis wird 1974 mit einer Einwellen-Maschine von 1150 MW und anschließend mit einer weiteren von 1300 MW (I) in Betrieb gehen. Diese Umstände beeinflussen selbstverständlich auch die Größe der Kraftwerke, die für den Spitzenbetrieb einzusetzen sind. Unter Einhaltung einer gewissen Relation kann deshalb davon ausgegangen werden, daß zur Spitzendeckung in einem großen Versorgungsnetz heute nur noch Kraftwerksleistungen in der Größenordnung ab 700 MW in Betracht kommen, und daß sich diese Grenze von Jahr zu Jahr nach oben verschieben wird.

Der zweite, die bisherige Pumpspeicherung beeinflussende Faktor ergibt sich aus der Tatsache, daß die Nachtbelastungstäter des 24stündigen Belastungsdiagramms (Abb. 1), aus denen die Pumpenergie stammt, vor allem im Winter nicht mehr so stark ausgeprägt sind wie früher. Durch diese Auffüllung des Nachtbedarfs, die in erster Linie auf das außerordentliche Anwachsen der elektrischen Speicherheizung während der kälteren Jahreszeit zurückzuführen ist, wird die Pumpströmlieferung zeitweise begrenzt. Um einen Ausgleich für das nur kurzzeitig zulässige Nachtpumpen zu erhalten, sind Speichermöglichkeiten erforderlich, die es erlauben, die fehlende Regeneration des Speichers während des ohnehin länger werdenden arbeitsfreien Wochenendes vorzunehmen.

Die Berücksichtigung der vorgenannten Entwicklungstendenzen, die auf eine Vergrößerung von Leistung und Arbeitsinhalt der Pumpspeicherung zielen, hat zwangsläufig zur Folge, daß größere Speicherbecken benötigt werden, als dies noch vor einem Jahrzehnt für richtig gehalten wurde. Überträgt man diese vom Verbundnetz her bedingten Umstände auf die Mitbenutzung einer Wasserstraße als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks für den geforderten Spitzenleistungsbereich um 700 MW, so erkennt man, daß dem dafür erforderlichen Speichervolumen einer Stauhaltung von Natur aus bestimmte Grenzen gesetzt sind. Diese Grenzen werden an den Wasserstraßen, die durch eine lückenlose Stauregelung bereits für die Gewinnung von Laufkraftenergie erschlossen sind, weiter eingeengt, da auf die dafür bestehenden Konzessionen Rücksicht genommen werden muß.

Das als Unterbecken nutzbare Speichervolumen ist wesentlich von der Stauhaltungslänge abhängig, die bei der Aufstellung des Stufenplans für die Stauregelung nach dem jeweiligen Stand der Technik gewählt wurde [17]. Vergleicht man unter diesem Gesichtspunkt die Stauregelungen an den deutschen Wasserstraßen Main, Mosel und Donau, so ist der Unterschied der Haltungslängen beträchtlich, obwohl sie etwa die gleichen Gefällsverhältnisse aufweisen (Bild 7). Der Main, dessen Ausbau oberhalb von Aschaffenburg 1922 begann, hat zwischen der Mündung und Bamberg 37 Stufen mit einer durchschnittlichen Haltungslänge von 11 km. Die Stauregelung der Mosel, die nach einem Entwurf von 1903 mit 32 Stufen und nach einem Entwurf von 1919 mit 20 Stufen ausgeführt werden sollte, erhielt 1956 schließlich nur 14 Stufen und weist fast 20 km lange Haltungen auf. An der bis jetzt nur teilweise ausgebauten Donau von Kelheim bis zur Landesgrenze sind 9 Stufen vorgesehen, deren Stauhaltungen im Mittel 24 km lang werden sollen.

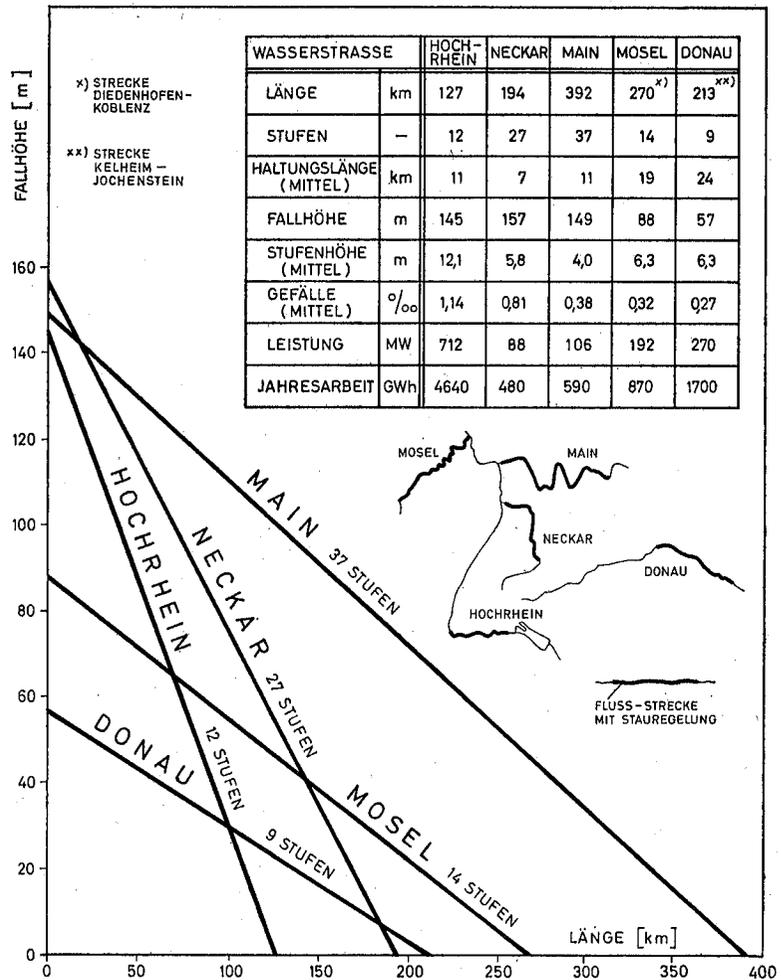


Abb. 7: Charakteristik der Stauregelungen von Wasserstraßen mit Laufkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland

Es wurde bereits erwähnt, daß die Stauhaltungen am Main für die Zwecke der Pumpspeicherung nicht mehr in Betracht kommen. Dagegen besteht die Absicht, einige der fast doppelt so langen Haltungen der Mosel als Unterbecken mitzubenutzen. Dies wird durch den Umstand begünstigt, daß die oberste deutsche und die unterste Stauhaltung nach den bereits vorliegenden Konzessionen mit einem Speichervolumen von je 1,6 Mio m³ bewirtschaftet werden dürfen, und zwar als Rückhalte- bzw. Ausgleichbecken für den Schwellbetrieb. Das nach den neuesten Planungen vorgesehene Pumpspeicherkraftwerk Schleicherberg benötigt bei 4,25stündigem Vollastbetrieb mit 700 MW eine Pendelwassermenge von 3,6 Mio m³, die in drei benachbarten Haltungen untergebracht werden kann (Abb. 5 e). An der Donau bei Jochenstein-Riedl ist ein Pumpspeicherkraftwerk mit ebenfalls 700 MW Spitzenleistung geplant, wozu bei einem täglichen Einsatz von 6 Stunden ein Arbeitsinhalt des Unterbeckens von 5,3 Mio m³ benötigt wird [16]. Diese Wassermenge soll zunächst nur in der etwa 50 cm hohen Lamelle der Stauhaltung Aschach gespeichert werden (Abb. 5 a).

Weniger günstig liegen die Voraussetzungen für die Schaffung großer Speichervolumina am Neckar, dessen 27 Stauhaltungen im Mittel nur 7 km lang sind. Früher durchgeführte Planungen eines auf drei Haltungen ausgedehnten Unterbeckens haben jedoch ergeben, daß das damit erzielbare Speichervolumen bei mittlerem Abfluß nur 1,1 Mio m³ beträgt. Vom Hochrhein, der durch das stärkste Gefälle und die höchsten Stufen bei durchschnittlich 11 km langen Haltungen gekennzeichnet ist [4], sind keine neuen Pumpspeicherprojekte bekanntgeworden, obwohl die topographischen und hydrologischen Voraussetzungen für weitere Unterbecken im Strom durchaus günstig sind. Die Planungen werden dadurch erschwert, daß noch keine Entscheidung über die Weiterführung der Großschiffahrt bis zum Bodensee getroffen wurde, und daß der Hochrhein ein Grenzgewässer darstellt, bei dem die Interessen von zwei Staaten zu berücksichtigen sind.

4. Begrenzung der Krafternutzung an Wasserstraßen durch den Schiffsverkehr

4.1. Verkehrssicherheit der Schiffahrt

Der Wechsel von Turbinen- und Pumpenbetrieb im elektrizitätswirtschaftlich bestimmten Tageszyklus verändert die Fahrwasserhältnisse in den Stauhaltungen, wodurch sich Auswirkungen auf die Schiffahrt und auf die baulichen Anlagen der Wasserstraße ergeben. Für die Schiffahrt bedeuten diese Auswirkungen einen Eingriff in die Sicherheit und Leichtigkeit des fahrenden und ruhenden Verkehrs. Unter Umständen können sie auch die Transportleistung und den Aufwand an Antriebsenergie beeinflussen.

Bei der Durchfahung der vom Pumpspeicherbetrieb beeinflussten Fahrwasserstrecke wird der Schiffsführer meist unvorbereitet andere Fahrwasserbedingungen vorfinden, als er sie von den ungestörten Stauhaltungen gewohnt ist. In der Zeitspanne vom Erkennen der geänderten Fahrwasserhältnisse bis zum Wirksamwerden der schiffahrtsüblichen Manöver (wie Rudergabe und Änderung der Antriebsleistung) darf das Schiff seine Steuerfähigkeit nicht verlieren. Außerdem darf es nicht stärker in seinem Kurs beeinflusst werden, als es nach den örtlichen Bedingungen der Fahrinne und des Verkehrs aus Sicherheitsgründen vertretbar ist. Wie für den fahrenden gilt auch für den ruhenden Verkehr die Forderung, daß die planmäßige Fahrwassertiefe und die Durchfahrts Höhen unter Brücken erhalten sowie die Anlege- und Liegestellen weiterhin verkehrssicher benutzbar bleiben [15].

Sofern durch eine vom Pumpspeicherbetrieb verursachte Veränderung der Fahrwasserhältnisse nachteilige Auswirkungen auf die Sicherheit des Schiffsverkehrs zu erwarten sind, ist ihnen durch bauliche Maßnahmen und betriebliche Einschränkungen zu begegnen.

4.2. Fahrwasserhältnisse im Unterbecken

Der Pumpspeicherbetrieb wirkt sich in erster Linie auf die als Unterbecken dienenden Stauhaltungen aus. Es können aber vor allem bei im Verhältnis zur Pendelwassermenge kleinen Abflüssen auch flußabwärts anschließende Teile der Wasserstraße mit zeitlicher Verschiebung beeinflusst werden. Die mit dem Krafthaus des Pumpspeicherwerks unmittelbar in Verbindung stehende Haltung ist jedoch am stärksten Veränderungen der Fahrwasserhältnisse ausgesetzt. Eine besondere Rolle spielen dabei die Wasserspiegellagen und die Strömungsverhältnisse.

4.2.1 Wasserspiegellage

Bei der Beurteilung des Einflusses der Inbetriebnahme der Turbinen oder Pumpen auf den Wasserspiegel der Unterbecken-Stauhaltung ist mit Rücksicht auf die Schiffahrt zu unterscheiden, ob

1. das Stauziel verändert werden darf, also eine bestimmte Bewirtschaftungsamplitude nutzbar ist, oder
2. das Stauziel unverändert bleiben muß und ob die Entnahme und Rückgabe nahe dem Wehr (unteres Ende der Haltung) oder im Bereich der mit dem Abfluß wechselnden Stauwurzel (oberer Teil der Haltung) stattfindet.

Dabei kann den Wasserspiegeländerungen am Ende der Stauhaltung bei niedrigen natürlichen Abflüssen besondere Bedeutung zukommen, weil der benetzte Querschnitt dort im allgemeinen kleiner und die Wassertiefe geringer ist, so daß bei gleichbleibender Rückgabe bzw. Entnahme relativ stärkere Schwankungen entstehen.

Im ersten Fall (Stauziel veränderlich) richtet sich bei gegebener Größe und Bewirtschaftungsamplitude des Speichervolumens der Turbinenzufluß oder die Pumpenförderung während der jeweiligen Betriebszeit nach den der Schifffahrt zumutbaren Steig- oder Sinkgeschwindigkeiten des Wasserspiegels der Stauhaltung und der sich daraus ergebenden Änderung des Spiegelgefälles. Die Änderung der Höhe des Wasserspiegels kann sich im wesentlichen nur auf den ruhenden Verkehr (in Schleusenvorhäfen, an Liege- und Übernachtungsplätzen), im Ausnahmefall auch auf die Anlegestellen von Fähren auswirken.

Die an bestehenden Stauregelungstrecken bisher gewählten Bewirtschaftungsamplituden des Unterbeckens schwanken zwischen 50 und 70 cm. Andererseits liegen die Füll- bzw. Entleerungszeiten zwischen 4 und 8 Stunden. Innerhalb dieser Grenzen ergeben sich folgende mittlere Vertikalgeschwindigkeiten am Wehr in cm/Std.:

Betriebsdauer Stunden	Bewirtschaftungsamplitude des Unterbeckens von		
	50 cm	60 cm	70 cm
10	5,00	6,00	7,00
8	6,25	7,50	8,75
6	8,33	10,00	11,66
4	12,50	15,00	17,50

Wie die folgenden Beispiele zeigen, liegen die Höhenänderungen je Stunde in einer Größenordnung, die dem Steigen und Fallen des Wasserspiegels bei HW (auch unterhalb des HSW) entspricht. Dabei muß man davon ausgehen, daß die bestehenden baulichen, betrieblichen und organisatorischen Maßnahmen zur Sicherheit der Schifffahrt für diese hochwasserbedingten Wasserspiegeländerungen auch den durch die Pumpspeicherung verursachten Änderungen genügen, vorausgesetzt, daß die Schifffahrt grundsätzlich auf die Möglichkeit des jederzeitigen Auftretens der Wasserspiegeländerungen und zwar unabhängig von der natürlichen Wasserführung durch Bekanntmachungen oder örtliche Hinweise vorbereitet ist. Für den Schwellbetrieb an der Mosel sind bei den 1,6 Mio m³ fassenden beiden Endbecken, um die Interessen von Schifffahrt, Fischerei und Naturschutz nicht zu beeinträchtigen, Stauspiegelschwankungen bis zu 60 cm zugelassen, d. h. bei 12stündigem Absenken 5 cm/Stunde [3].

Nach [5] soll das Speichervolumen bei reiner Pumpspeicherung so bemessen sein, daß der Nutzinhalt der Stauhaltung bei Einsatz aller Pumpen in rd. acht Stunden gefördert werden kann. Bei 40 m³/s Pumpenförderung wären dies rd. 1,15 Mio m³. Wird dieses Speichervolumen wie z. B. beim Kraftwerk Waldshut durch Höherstau der Stauhaltung Albrück-Dogern um 50 cm geschaffen, so ergibt sich dabei eine mittlere Sinkgeschwindigkeit von 6,25 cm/Stunde. Wählt man z. B. wie in Jochenstein-Riedl ein Speicher-

volumen von etwa 5,4 Mio m³ mit einem Bewirtschaftungsbereich von 50 cm, so könnten beim Turbinenbetrieb annähernd abgefahren werden

in 6 Stunden	250 m ³ /s und
in 4 Stunden	375 m ³ /s

unter der Voraussetzung, daß mittlere Steiggeschwindigkeiten von 8,33 bzw. 12,5 cm/Std. zugelassen werden.

Bei der Festlegung der zulässigen Wasserspiegeländerungen infolge Pumpspeicherung ist es unerlässlich, Modellversuche durchzuführen, um die Auswirkungen der verschiedenen Varianten an den nachgebildeten örtlichen Verhältnissen zu untersuchen. Bemerkenswert sind die für das Pumpspeicherkraftwerk Geesthacht an der Elbe im Jahre 1964 durchgeführten Modellversuche, die das Ziel hatten, die Möglichkeiten einer Leistungserhöhung von bisher je 3 Pumpen (117 m³/s) und Turbinen (189 m³/s) auf 4 Pumpen (181 m³/s) und 6 Turbinen (397 m³/s) zu untersuchen. Die Versuche wurden bei einem Elbeabfluß von 134 m³/s (etwa niedrigstes Niedrigwasser) für Pumpwasserentnahmen bis zu 309 m³/s durchgeführt. Bei Annahme eines etwa 8stündigen Pumpenbetriebs mit 231 m³/s, also mit einer um 50 m³/s größeren Entnahme als geplant, wurde eine Absenkung des Stauspiegels um 31 bis 32 cm gemessen. Dies entspricht einer mittleren Wasserspiegeländerung von rd. 4 cm/Stunde.

Bedeutsamer für die Schifffahrt, wenn auch erheblich seltener, ist der anfangs erwähnte zweite Fall, daß die Entnahme und Rückgabe im Bereich der mit der Wasserführung wechselnden Stauwurzel der Unterbecken-Stauhaltung liegt und ihr Stauziel nicht verändert werden darf. Hier ergibt sich ein grundsätzlich anderes Bild der Änderung der Wasserspiegellagen in Abhängigkeit vom Pumpspeicherbetrieb (Abb. 8). Dabei sind die Auswirkungen auf den ruhenden und fahrenden Verkehr im Prinzip die gleichen wie die im vorher behandelten Fall. Nur können sie größere Absolutwerte erreichen. Es wird daher auch hier auf der Grundlage von hydraulischen oder mathematischen Modellen zu klären sein, wo die Grenzen der dem Schiffsverkehr ohne Beeinträchtigung seiner Sicherheit zumutbaren Wasserspiegeländerungen liegen. Beachtenswert ist hierbei aber, daß die sich nach energiewirtschaftlichen Überlegungen ergebende Folge von Pumpen-

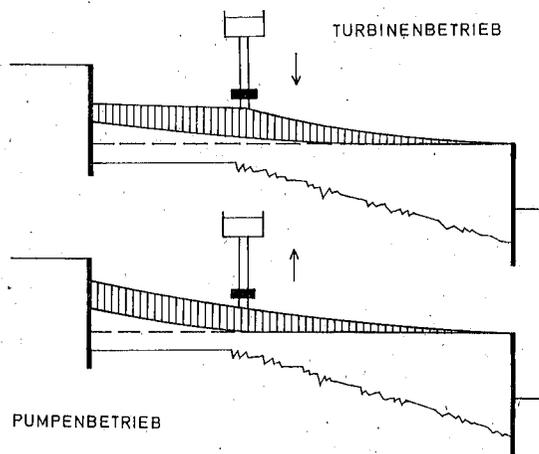


Abb. 8: Änderung des Wasserspiegels in einer als Pumpspeicher-Unterbecken dienenden Stauhaltung bei konstantem Stauziel

und Turbinenbetrieb einen ständigen Wechsel instationärer Vorgänge verursacht, ohne daß, abgesehen vom mehrstündigen Pumpenbetrieb bei Nacht, überhaupt ein stationärer Zustand erreicht wird (Abb. 9).

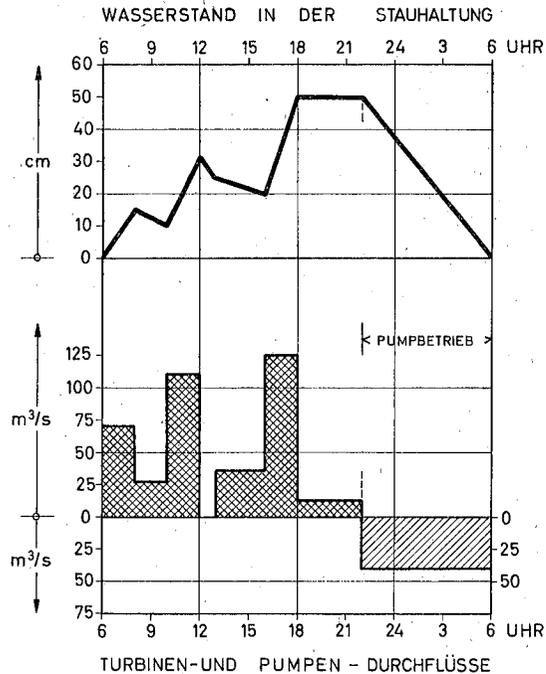


Abb. 9: Wasserstandsganglinie einer als Unterbecken dienenden Stauhaltung im Tageszyklus eines Pumpspeicherkraftwerks mit natürlichem Zufluß

Bei kürzlich durchgeführten Modellversuchen für die Unterstufe des Pumpspeicherkraftwerks Bremm an der Mosel wurden in dieser Hinsicht interessante Ergebnisse über die Änderung der Wasserspiegelhöhen am Beginn und Ende des Turbinen- und Pumpenbetriebs gewonnen [15]. Der Turbinenbetrieb wurde beim niedrigsten Niedrigwasser (= $25 \text{ m}^3/\text{s}$) begonnen, der Pumpenbetrieb etwa bei Mittelwasser. Der Verbindungskanal zum Kraftwerk mündet im Bereich der mit der Wasserführung wechselnden Stauwurzel im oberen Viertel der Stauhaltung Fankel. Nach $2\frac{1}{2}$ stündigem Turbinenbetrieb mit $214 \text{ m}^3/\text{s}$ stieg der Wasserspiegel an der Rückgabestelle um $1,0 \text{ m}$ (= $40 \text{ cm}/\text{Std.}$), danach stellte sich 5 cm höher der Beharrungszustand ein. Der Pumpenbetrieb erreichte den Beharrungszustand ebenfalls nach $2\frac{1}{2}$ Stunden. Die stärksten Wasserpiegelländerungen traten kurzfristig am Anfang des Turbinenbetriebs mit $214 \text{ m}^3/\text{s}$ (etwa $12 \text{ cm}/\text{min}$) auf. Diese hohen Werte führten schließlich dazu, daß die im Projekt zunächst vorgesehenen Turbinen- und Pumpen-Durchflüsse auf $120 \text{ m}^3/\text{s}$ begrenzt und damit die maximale Steiggeschwindigkeit auf etwa $3,5 \text{ cm}/\text{min}$ reduziert wurden. Der Verlauf der für diesen Fall ermittelten Wasserpiegelländerungen ist in Abb. 10 dargestellt.

Neben diesen Einflüssen sind die Wirkungen der Wasserspiegeländerungen auf die bauliche Sicherheit der Ufer zu beachten. Vergleicht man die maximalen Steig- und Fallgeschwindigkeiten der Wasserspiegellagen wie sie aus natürlichen Ursachen, also Hoch-

wasser oder Tide, entstehen, mit denjenigen, die durch den Pumpspeicherbetrieb oder durch das fahrende Schiff verursacht werden, so lassen sich etwa folgende Verhältniszahlen feststellen:

Hochwasser	0,01 cm/s
Pumpspeicherbetrieb	0,25 cm/s
Schiffahrt	15,00 cm/s.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß in gleicher Reihenfolge die Häufigkeit des Ereignisses erheblich zunimmt, die absolute Größenordnung der Wasserspiegeländerungen jedoch abnimmt. Das stützt die Annahme, daß die Beanspruchung durch Pumpspeicherbetrieb für Dimensionierung und Bauweise der Böschungen und Uferbefestigungen nicht maßgebend ist. Im Einzelfall können spezielle Untersuchungen zu dieser Frage erforderlich werden.

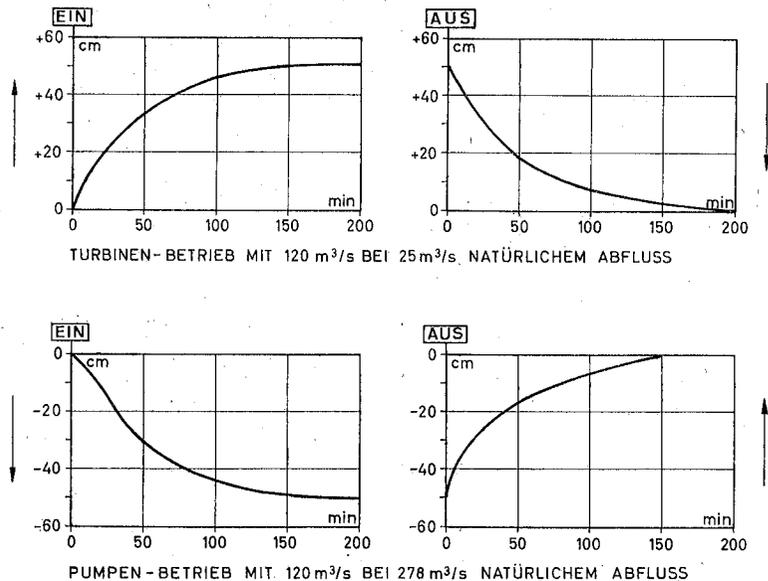


Abb. 10: Änderung der Wasserspiegellhöhen einer Unterbecken-Stauhaltung vor dem Verbindungsbauwerk Wasserstraße/Pumpspeicherung beim Ein- und Ausschalten der hydraulischen Maschinen

Einen besonderen Einfluß auf die Spiegellage des Fahrwassers können Schwall- und Sunkwellen ausüben, die beim Anfahren mit voller Last, bei plötzlichen Änderungen der kontinuierlichen Füllung oder Entleerung des Unterbeckens und bei schnellem Wechsel der Betriebsarten entstehen. Diese Wellen haben ihre Größtwerte unmittelbar im Bereich des die Stauhaltung tangierenden Verbindungsbauwerks. Sofern im Flußlauf keine Engstellen bestehen, bauen sich die Wellen nach ober- und unterstrom kontinuierlich ab.

Bei den Modellversuchen für die Unterstufe des Pumpspeicherwerks Bremm an der Mosel mit einem Abfluß von 25 m³/s ergaben sich je nach dem Turbinendurchfluß Schwallhöhen von 24 cm (214 m³/s) bzw. 14 cm (120 m³/s). Die diesen Verhältnissen entsprechenden Sunkwellen beim Pumpenbetrieb waren kleiner. An der Elbe beim Pumpspeicherwerk Geesthacht werden die Änderungen des Betriebszustandes bei niedrigem Abfluß weitgehend und rechtzeitig an dem 4 km entfernten Wehr ausgeglichen, so

daß ein ausgesprochener Füllschwall nicht auftritt. Im Rahmen der erwähnten Modellversuche wurden nach dem Einschalten der 4 Pumpen ($231 \text{ m}^3/\text{s}$) am Pumpspeicherwerk Sunkwellen von 5—6 cm Höhe gemessen, die in 1,5—2 km Entfernung von der Entnahmestelle abgebaut waren.

Gefahren für die Schifffahrt sind aus Schwall- und Sunkwellen in einer Größenordnung von 20 bis 30 cm Höhe nicht zu erwarten. Diese Erscheinungen haben eine gewisse Ähnlichkeit mit den bei Schnellschluß der Turbinen von Laufkraftwerken ausgelösten Schwallwellen im Oberwasser und Sunkwellen im Unterwasser. Bei Stauhaltungen mit Pumpspeicherbetrieb können erforderlichenfalls Erleichterungen für den Schiffsverkehr dadurch erreicht werden, daß die Entnahme und die Rückgabe des Betriebswassers bei niedrigem natürlichen Abfluß nicht schlagartig in vollem Umfang, sondern langsam ansteigend erfolgen.

4.2.2 Strömungsverhältnisse

Durch die Rückgabe und Entnahme des Betriebswassers werden die Strömungsgeschwindigkeiten in der Stauhaltung nach Richtung und Größe verändert. Bezogen auf die Achse der Fahrrinne unterscheidet man Quer- und Längsgeschwindigkeiten. Ihre Auswirkungen auf die Schifffahrt sind um so geringer, je weiter die Fahrrinne von der Rückgabe- bzw. Entnahmestelle entfernt liegt. Das Strömungsbild in der Haltung ist außerdem abhängig von der Querschnittsgröße, der Gestaltung und der Anordnung des Verbindungsbauwerks. Auch hierüber können nur Modellversuche Klarheit schaffen.

Am empfindlichsten reagiert ein fahrendes Schiff auf Querströmungen. Bei der Rückgabe sind sie überwiegend nach dem gegenüberliegenden Ufer, bei der Entnahme zum Verbindungsbauwerk hin gerichtet. Ihre Größe soll ein bestimmtes Maß, das von der Tonnage und Fahrgeschwindigkeit des Schiffes sowie von der Breite der Wasserstraße abhängig ist, nicht überschreiten. Die vielfach geforderte Begrenzung der Quergeschwindigkeit auf 30 cm/s ist noch nicht durch ausreichende Untersuchungen begründet. Die bisherigen Erfahrungen mit diesem Maß berechtigen allerdings dazu, es vorläufig als Richtwert zu verwenden, da bei ausgeführten Objekten, denen dieses Maß zugrunde gelegt wurde, noch keine nachteiligen Wirkungen auf die Schifffahrt beobachtet wurden.

Bei Geesthacht dürfte die Querströmung im jetzigen Ausbauzustand mit 3 Turbinen ($171 \text{ m}^3/\text{s}$) und mittlerem Elbe-Abfluß in etwa 30 m Entfernung vom Rückgabe-Ufer 15 bis 20 cm/s nicht überschreiten. Beim Pumpenbetrieb erreichen die Querströmungen geringere Werte, so daß sie für die Schifffahrt ohne Bedeutung sind. Nach den Ergebnissen der Modellversuche mit 6 Turbinen ($397 \text{ m}^3/\text{s}$) ergaben sich bei niedrigstem Niederwasser ($135 \text{ m}^3/\text{s}$) Querströmungen

am Rückgabe-Ufer	von 30 bis 35 cm/s ,
in der Bühnenstreichlinie	von 15 bis 19 cm/s und
im Fahrwasser	von 10 bis 13 cm/s .

Für die Mosel bei Bremm erbrachten die Versuche bei vollem Turbinendurchfluß (214 bzw. $120 \text{ m}^3/\text{s}$) und $25 \text{ m}^3/\text{s}$ natürlichem Abfluß Quergeschwindigkeiten in der Achse der Fahrrinne von durchweg unter 20 cm/s .

In beiden Fällen sind die genannten niedrigen Querströmungen nur durch besondere bauliche Maßnahmen erreicht worden. Diese werden ausführlich in Abschnitt 5 behandelt.

Die normale Längsströmung in der Stauhaltung wird durch den Pumpspeicherbetrieb ebenfalls beeinflusst, allerdings mit geringeren Auswirkungen auf den Schiffsverkehr als bei Querströmungen. Bei Turbinenbetrieb steigt die Längsgeschwindigkeit

unterhalb des Rückgabebauwerks von der normalen Fließgeschwindigkeit auf diejenige des um den Turbinendurchfluß vermehrten Abflusses an, während sie oberhalb absinkt. Umgekehrt nimmt bei der Entnahme die Längsgeschwindigkeit unterhalb des Bauwerks sehr stark ab, während sie oberhalb erhöht wird (siehe Abb. 8). Diese Änderungen der Längsgeschwindigkeiten in Bauwerksnähe müssen durch bauliche Maßnahmen auf eine solche Länge ausgedehnt und vergleichmäßigt werden, daß hieraus keine wesentliche Verminderung der Steuerfähigkeit des Schiffes entsteht, die nicht durch schiffahrtsübliche Manöver in der Übergangsstrecke von der einen zur anderen Gefällegelage ausgeglichen werden kann. Als für die Schifffahrt annehmbar sind Strömungsverhältnisse zu bezeichnen, die auf 100 m Länge Geschwindigkeitsänderungen in der Fließrichtung von höchstens 15 bis 20 cm/s verursachen. Werte dieser Größenordnung sind jedoch nur bei entsprechender Gestaltung des Verbindungsbauwerks zu erreichen.

Eine stromauf gerichtete Längsströmung kann bei kleinem Abfluß kurzzeitig am Beginn des Turbinenbetriebs entstehen, wenn die Auffüllung der Stauhaltung nur zum kleineren Teil aus dem natürlichen Zufluß, zum größeren Teil aber aus dem Turbinenzufluß erfolgt. Diese unter Umkehrung der Gefällerrichtung entstehende Rückströmung ist für den Schiffsverkehr von Bedeutung. Sie ist um so größer, je kleiner der natürliche Abfluß ist. In für die Schifffahrt schwierig zu befahrenden Abschnitten der Stauhaltung dürfen keine Rückströmungen auftreten. An der Mosel werden bei Abflüssen zwischen 25 und 50 m³/s und 120 m³/s Turbinenzufluß maximale Rückströmungsgeschwindigkeiten zwischen 30 und 10 cm/s als für die Schifffahrt noch tragbar angenommen.

4.3. Fahrwasserverhältnisse stromab vom Unterbecken

Alle Eingriffe in den natürlichen Abfluß der als Unterbecken eines Pumpspeicherkraftwerks dienenden Stauhaltung setzen sich mit zeitlicher Verzögerung und retentionsbedingter Abminderung in den unterliegenden Stauhaltungen und darüber hinaus in der frei fließenden Wasserstraße fort. Es ist daher bei der Bewirtschaftung der Pendelwassermenge darauf Rücksicht zu nehmen, daß zur Wahrung der Bedürfnisse der Schifffahrt ein möglichst gleichmäßiger Abfluß erzielt wird. Etwaige Beeinträchtigungen der Schifffahrt gehen in dem Maße zurück, in dem die Betriebswassermengen der Pumpspeicherung kleiner gehalten werden.

4.3.1 Stauhaltungen

Liegen mehrere Stufen einer Stauregelungsstrecke unterhalb des Pumpspeicherkraftwerks, so ist anzustreben, den Abfluausgleich im Unterwasser der Staustufe zu erreichen, deren Oberwasser von der Pumpspeicherung als Bewirtschaftungsraum benutzt wird. Weiterhin ist es durch gezielten Betrieb der unterliegenden Laufkraftwerke möglich, die vom Pumpspeicher-Unterbecken ausgehenden Wirkungen zunehmend abzubauen. Im Falle des eingangs erwähnten Kippbetriebes der Laufkraftwerkskette, die aus der gleichzeitigen Höherbeaufschlagung der Turbinen während der Erzeugungsperiode des Pumpspeicherwerks Nutzen zieht, ist die unterste Stauhaltung unter Umständen als Ausgleichbecken auszubilden. Als Folge dieser ausgleichenden Maßnahmen wird die für Flußkraftwerke sonst übliche Konzessionsbedingung, das Oberwasser konstant zu halten, hinfällig.

Am Beispiel des am Hochrhein liegenden Pumpspeicherwerks Säkingen, der Unterstufe, des Hotzenwaldwerks, sollen die Bedingungen erläutert werden, nach denen die Entnahme-Stauhaltung Säkingen und die unterhalb liegende Stauhaltung Ryburg-Schwörstadt bewirtschaftet werden. Allerdings handelt es sich beim Hochrhein nur mittelbar um eine Wasserstraße, weil die Stauhaltungen von der Großschifffahrt noch nicht genutzt werden. Dennoch sind in den neuen wasserrechtlichen Konzessionen der beiden

Laufkraftwerke Bestimmungen enthalten, welche die Berücksichtigung des Schiffsverkehrs fordern, wobei in der Hauptsache die Großschiffahrt gemeint ist, die unterhalb der Kraftwerkskette des Hochrheins auf dem Oberrhein verkehrt. Hiernach haben die beiden Laufkraftwerke ihre Stauhaltungen durch geeignete Rückhaltung und Weitergabe des vom Pumpspeicherwerk der Haltung und dem Kraftwerk Säckingen und von diesem der Haltung und dem Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt zufließenden Wassers so zu bewirtschaften, daß im Unterwasser ein möglichst gleichmäßiger Wasserabfluß erzielt und die Schifffahrt nicht beeinträchtigt wird. Die diesbezügliche Inanspruchnahme der beiden Stauhaltungen in Abhängigkeit vom Abfluß des Rheins am Pegel Rheinfelden ist nach [10] in Abb. 11 graphisch dargestellt. Das Diagramm zeigt außerdem, wieviel Wasser beim jeweiligen Rheinabfluß vom natürlichen Abfluß der Stauhaltung Säckingen zurückgehalten werden darf. Bei Abflüssen unter 800 m³/s ist eine Rückhaltung nicht gestattet. Die obere Grenze von 64 m³/s (bei über 1550 m³/s Abfluß) entspricht der maximalen Pumpenförderung des Speicherkraftwerks Säckingen.

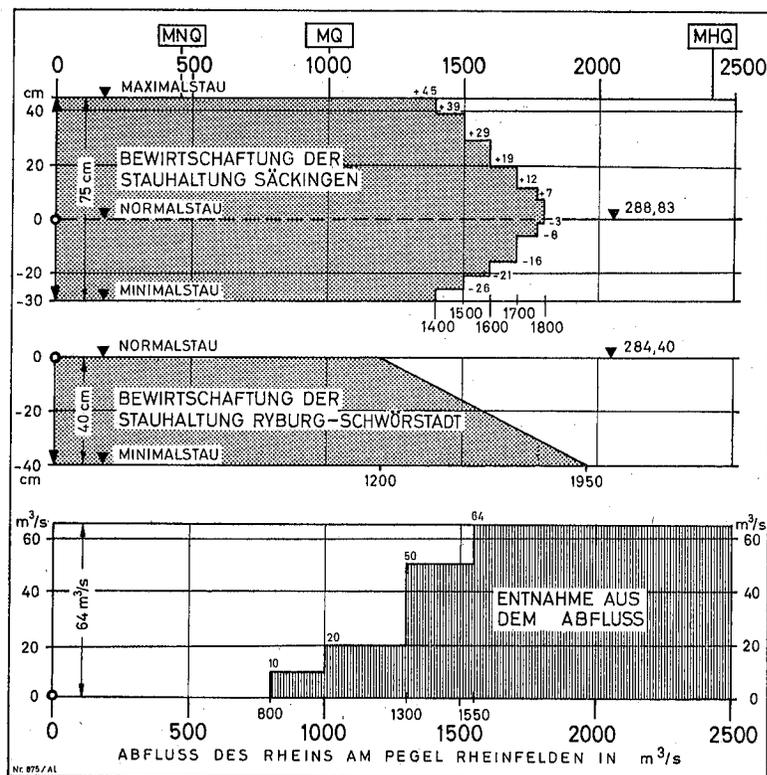


Abb. 11: Inanspruchnahme der Stauhaltungen Säckingen und Ryburg-Schwörstadt als Unterbecken der Unterstufe Säckingen des Hotzenwald-Pumpspeicherkraftwerks in Abhängigkeit vom Abfluß des Hochrheins

Liegt die als Unterbecken benutzte Stauhaltung wie an der Mosel innerhalb einer Schwellbetriebskette, so können der Kopfspeicher und das untere Regulierungsbecken durch planmäßige Bewirtschaftung zu dem wegen der Pumpspeicherung erforderlichen Abflüßausgleich herangezogen werden.

Eine Untersuchung dieser Einflüsse an einem wasserbaulichen Modell ist wegen der großen Längenausdehnung des Versuchsobjekts im allgemeinen nicht zweckmäßig. Dagegen bietet die elektronische Datenverarbeitung eine ausgezeichnete Möglichkeit, die Steuerung dieses wasserwirtschaftlichen Systems unter den verschiedensten Betriebsbedingungen rechnerisch zu erfassen.

4.3.2 Freier Fluß

Die Schifffahrt auf der an die unterste Haltung einer Stauregelungsstrecke anschließenden frei fließenden Wasserstraße kann durch ein oberhalb liegendes Pumpspeicher-Unterbecken im allgemeinen nur bei extremen Abflüssen beeinträchtigt werden.

Das Auftreten eines natürlichen Hochwassers während des Turbinenbetriebs bedeutet eine künstliche Abflußsteigerung, die unter Umständen betriebliche Einschränkungen erfordert. Man wird daher den Betrieb des Pumpspeicherkraftwerks und der evtl. anschließenden Laufkraftwerke so einrichten müssen, daß der Gefahrenbereich des natürlichen Hochwassers der Dauer und Höhe nach nicht überschritten wird. Für die Schifffahrt ist die Grenze derartiger Einschränkungen durch den höchsten schiffbaren Wasserstand gegeben.

Schwerwiegendere Auswirkungen auf die Schifffahrt können beim Pumpenbetrieb entstehen, wenn lange Entnahmezeiten zu einer lang anhaltenden Abflußminderung führen und diese bei Niedrigwasser eintritt. Um Behinderungen der Schifffahrt im frei fließenden Gewässerbereich zu vermeiden, muß eine genaue Abstimmung zwischen natürlichem Abfluß, Pumpenförderung und Pumpzeiten erfolgen. Eine Entnahme aus dem natürlichen Abfluß einer Stauhaltung ist dann nicht zulässig. Auf die Abhängigkeit der Wasserentnahme aus der Mosel vom Wasserstand des Rheins an ihrer Mündung wurde bereits hingewiesen.

Die an der Elbe erbaute Staustufe Geesthacht dient in gleicher Weise der Schifffahrt und Pumpspeicherung [2, 6, 13]. Sie hat den Zweck, einerseits die stromauf fortschreitende Erosion und Wasserspiegelabsenkung im Tidebereich aufzuhalten und damit die Schifffahrtsverhältnisse auf der Unter- und Oberelbe zu verbessern, andererseits das Unterbecken für das 4 km stromauf errichtete Pumpspeicherkraftwerk zu bilden. Auf den Bau eines Laufkraftwerks wurde verzichtet, so daß die Stauhaltung bis zu einem Abfluß von $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, von dem ab die Wehrverschlüsse vollständig gelegt sind, ausschließlich nach den Forderungen der Pumpspeicherung bewirtschaftet werden kann. Unterhalb des Wehres läßt sich der Wasserentzug beim Pumpenbetrieb im jetzigen Ausbauzustand kaum erkennen, weil die Absenkung von den zahlreichen Einflüssen der Tidewasserstände überlagert wird. Nach den Modellversuchen für den Vollausbau mit 4 Pumpen wird der Wasserstand 600 m unterhalb bei einem Abfluß von $135 \text{ m}^3/\text{s}$ (etwa niedrigstes Niedrigwasser) um 16 cm, bei einem Abfluß von $177 \text{ m}^3/\text{s}$ und gleichzeitigem Tidenniedrigwasser um 24 cm abgesenkt. Wenn während längerer Zeiten bei extrem niedrigen Abflüssen die Auswirkungen des Pumpbetriebs mit dem Tideniedrigwasser zusammentreffen, ergeben sich Schwierigkeiten für die Schifffahrt auf einer Strecke von 12 km unterhalb des Wehres. Treten dann gleichzeitig auch noch Winde aus Ost-Richtung auf, muß die Schifffahrt Wartezeiten in Kauf nehmen.

5. Bauliche Gestaltung des Verbindungsbauwerks

Um die Auswirkungen auf das vertretbare Maß abzumindern, sind neben betrieblichen Einschränkungen bauliche Maßnahmen im Unterbecken erforderlich. Diese konzentrieren sich im wesentlichen auf den Bereich der Wasserstraße, an dem die Rückgabe oder Entnahme des Betriebswassers stattfindet. Für die bauliche Gestaltung dieser Kontaktstelle

ist im allgemeinen der Turbinenzufluß maßgebend, weil er wegen der kürzeren Dauer des Erzeugungsbetriebs größer ist als die Pumpenförderung, und weil die von ihm ausgelösten zusätzlichen Strömungen nach der Fahrrinne gerichtet sind.

5.1. Lage zur Stauhaltung

Die Maschinengruppen eines Pumpspeicherwerks, dessen Unterbecken in einer Stauhaltung liegt, haben wegen der relativ geringen Wasserspiegelschwankungen in der Regel liegende Wellen, während die von Talsperren gebildeten tiefen Stauräume stehende Maschinensätze mit unten angeordneten Pumpen erfordern (1). Das Krafthaus kann entweder in offener Bauweise unmittelbar entlang dem Ufer der Wasserstraße errichtet oder in entsprechender Entfernung von dieser als unterirdische Kaverne bzw. Hochbau ausgebildet werden. Hiernach richtet sich die bauliche Gestaltung der Rückgabe- und Entnahmeeinrichtungen an der Stauhaltung. Im Gegensatz zur Anordnung am Ufer benötigt das davon entfernt angeordnete Krafthaus einen Verbindungskanal zur Stauhaltung.

In beiden Fällen ist die Lage der Rückgabe- und Entnahmestelle so zu wählen, daß eine Verlandung durch Geschiebe möglichst nicht eintritt. Dies ist an der Außenseite einer Krümmung der Fall, wo die Feststoffracht von Natur aus klein ist und der an der Sohle verlaufende Geschiebetransport zum Innenufer abgelenkt wird. Beim Turbinenbetrieb werden die Verhältnisse hinsichtlich einer Ablagerung noch günstiger, beim Pumpenbetrieb aber kritischer, weil dabei Feststoffe angesaugt werden können.

Modellversuche für die Moselstauhaltung Fankel haben gezeigt, daß die von der Entnahmestromung erfaßte Feststoffmenge mit zunehmendem Abfluß abnimmt. Bei dem an der Donau geplanten Pumpspeicherwerk Jochenstein-Riedl wird damit gerechnet, daß jährlich 100 000 m³ Schwebstoffe in das Oberbecken gepumpt werden, von denen die Hälfte bei Turbinenbetrieb wieder abfließen dürfte.

5.2. Unmittelbare Verbindung mit der Stauhaltung

Um die Geschwindigkeit, mit der das abgearbeitete Turbinenwasser in die Stauhaltung einströmt, möglichst gering zu halten, ist ein entsprechend großer Querschnitt des Einleitungsbauwerks erforderlich, d. h. im Hinblick auf die Höhenbegrenzung eine möglichst große Durchflußbreite. Bei einem unmittelbar am Ufer der Stauhaltung liegenden Speicherkraftwerk herkömmlicher Bauart, bei dem die Saugschläuche der Turbinen diesen Querschnitt bestimmen, sind der Breitenausdehnung durch die danebenliegenden Pumpeneinläufe Grenzen gesetzt. Pumpenturbinen sind in dieser Beziehung günstiger.

Um die Einströmgeschwindigkeit noch mehr zu reduzieren, können je nach den örtlichen Gegebenheiten folgende bauliche Maßnahmen der Energieumwandlung oder Strömungsablenkung von Nutzen sein (17):

- Geschlossener gerader Sperrkörper parallel zum Fluß unmittelbar hinter jedem Turbinensaugschlauch (Prallwand, Strahlableiter)
- Gekrümmte geschlossene Leitwände, senkrecht zum Krafthaus beginnend und in einem spitzen Winkel zum Fluß am Rand der Fahrrinne endend
- Geschlitzte gerade Spundwand parallel zum Fluß zwischen Krafthaus und Rand der Fahrwasserrinne (Schlitzwand)
- Gerade Sohlschwelle parallel zum Fluß zwischen Krafthaus und Rand der Fahrrinne.

Selbstverständlich ist auch die kombinierte Anwendung einzelner dieser Maßnahmen möglich. Bei dem auf 140 m³/s Turbinenwassereinleitung ausgelegten Krafthaus Waldshut, das in Abb. 12 a dargestellt ist, wurde z. B. ein Sperrkörper in Form eines Strahlableiters nur für den Turbinen-Leerschub verwendet (1).

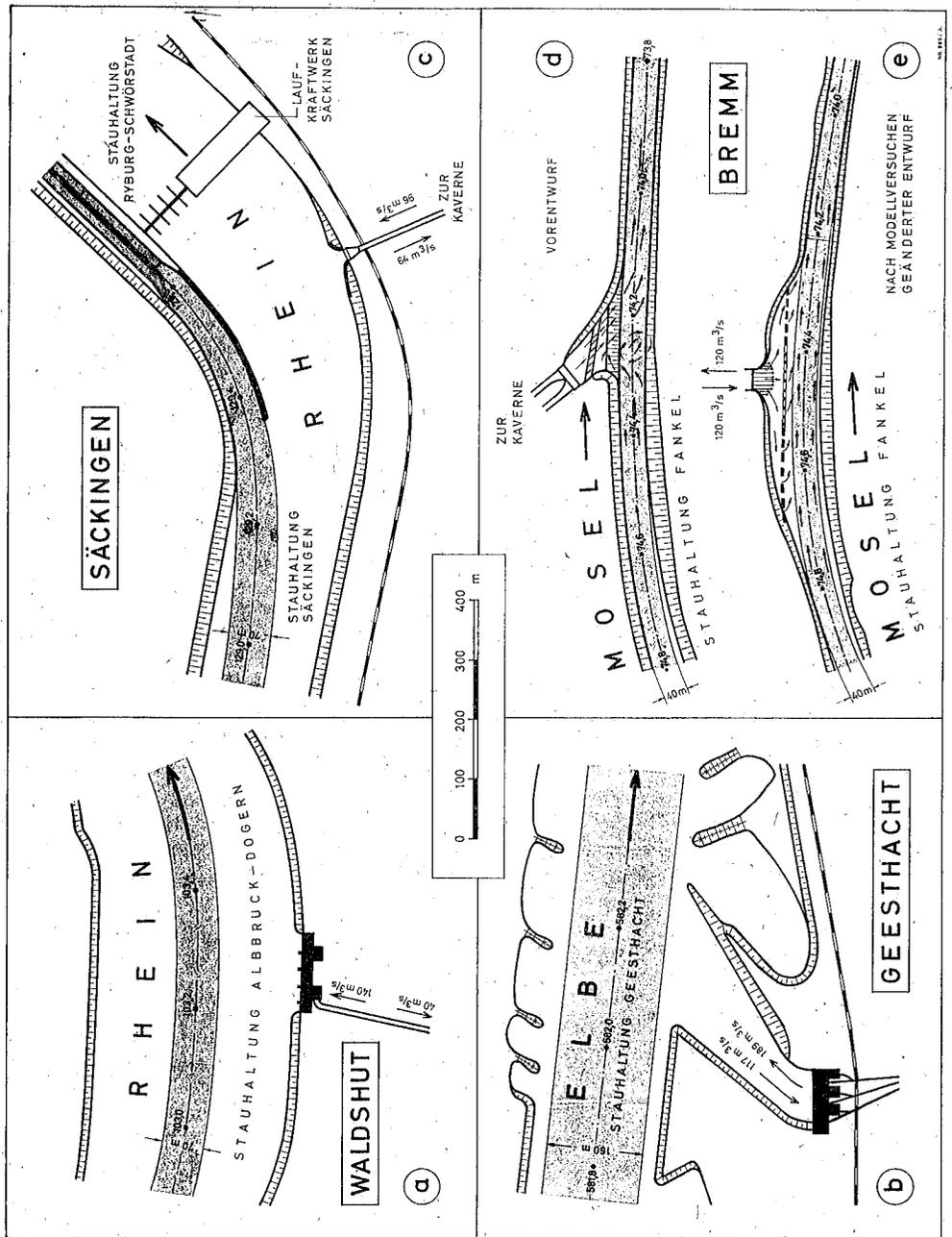


Abb. 12: Möglichkeiten der Anordnung des Verbindungsbauwerks zwischen Stauhaltung und Pumpspeicherkraftwerk

Am Krafthaus Geesthacht, bei dem die Strömungsgeschwindigkeiten an den Turbinenausläufen maximal bis zu 6 m/s betragen, erlaubte die Vorlandbreite der Elbe die Anordnung von zwei unterstrom ablenkenden Leitwänden (Abb. 12 b), von denen die konkave auch als Prallwand wirkt (2). Der bereits erwähnte Vollausbau auf 397 m³/s Turbinenzufluß erfordert nach den Modellversuchen zusätzlich die Anordnung einer Sohlschwelle längs der Hochwasserbegrenzungslinie sowie einer dritten Leitwand in der Mitte zwischen den beiden äußeren.

5.3. Verbindungskanal zur Stauhaltung

Das seitlich einer Stauhaltung angeordnete Krafthaus eines Pumpspeicherwerks benötigt, um diese als Unterbecken benutzen zu können, eine Stollen- bzw. Kanalverbindung zum Rückgabe- und Entnahmebauwerk. Im Gegensatz zur ufernahen Krafthausanordnung, bei der Rückgabe und Entnahme jeder Maschinengruppe voneinander getrennt liegen, fließen hier die beiden Ströme aller Maschinen durch den gleichen Querschnitt. Die Gestaltung des Verbindungsbauwerks wird dadurch wesentlich beeinflusst. Hinsichtlich seines Standorts am Ufer besteht der Vorteil einer gewissen Freizügigkeit, so daß die Wahl der am wenigsten durch Verlandung gefährdeten Stelle erleichtert wird.

Bei der in 5.2 behandelten Krafthauslage entlang dem Ufer liegt die Strömungsrichtung bei der Rückgabe zwangsläufig senkrecht zur Wasserstraße, so daß eine Umlenkung — wie im Falle Geesthacht — erst mit Hilfe von gekrümmten Leitwänden im Fluß erreicht werden kann. Ein Verbindungskanal gestattet dagegen jede beliebige Lage zur Achse der Fahrinne zwischen senkrecht und tangential. Jede Schräglage des Verbindungskanals hat besonders in schmäleren Flüssen den Nachteil, daß bei Pumpenbetrieb eine Umlenkung des Entnahmestroms um mehr als 90° erfolgt, durch die sich im Fluß eine stark drehende Walze bildet. Bei breiten Strömen wie Elbe und Donau ist diese Erscheinung für die Schifffahrt weniger von Bedeutung.

Bei der Krafthauskaverne Säckingen mit 96 m³/s Turbinenwasserzufluß ist das am oberen Ende des Stollens in der Stauhaltung zutagetretende Verbindungsbauwerk senkrecht zur Achse des Hochrheins angeordnet worden (Abb. 12 c). Für das Kavernenkrafthaus Jochenstein-Riedl ist zwischen einem kleinen Ausgleichsbecken und der Donau-Stauhaltung ein im Modell näher zu untersuchendes offenes Gerinne geplant, das den Turbinenwasserstrom von maximal 250 m³/s tangential in die Donau leitet.

Die Modellversuche für das Kavernenkrafthaus des unteren Pumpspeicherwerks Bremm mit der Moselhaltung Fankel als Unterbecken haben in bezug auf die Lage des Verbindungsbauwerks zum Flußlauf besonders interessante Ergebnisse erbracht [15]. Der Vorentwurf der Planung sah aus wirtschaftlichen Gründen eine sehr konzentrierte Anordnung und geringe Längenentwicklung des Bauwerks mit schräger Einmündung vor. Bei den Versuchen mit dieser ersten Bauwerksform ergaben sich vor allem zu starke, für die Schifffahrt nicht annehmbare Querströmungen (Abb. 12 d). Mit Hilfe eines aerodynamischen Modells wurde daraufhin eine zweite, stärker aufgegliederte Bauform entwickelt und diese dann ebenfalls an einem Wassermodell getestet. Sie besteht aus einem senkrecht zum Fluß gerichteten Verbindungskanal, der in eine in das Vorland eingeschnittene, etwa 40 m breite und 600 m lange Verteilerbucht mündet, die zum Fluß hin durch eine Trennwand begrenzt wird. Diese ist in der Mitte als Tauchwand ausgebildet und an den Flanken so unterbrochen, daß die Lücken mit zunehmendem Abstand von der Bauwerksmitte größer werden. Die Versuche zeigten, daß die Strömungsverhältnisse für die Schifffahrt annehmbar sind, nicht aber die Wasserspiegeländerungen bei den ursprünglich vorgesehenen Turbinenzuflüssen von 214 m³/s. Da die baulichen Maßnahmen allein nicht genügten, wurden betriebliche Einschränkungen in der bereits erwähnten Weise vorgenommen, daß man die Durchflüsse der Turbinen und Pumpen auf 120 m³/s

herabsetzte. Die Bauform wurde beibehalten, während die Abmessungen des Bauwerks im Verhältnis des reduzierten Zuflusses verkleinert wurden. Mit dieser dritten Bauform ergaben die Modellversuche schließlich für die Schifffahrt in jeder Beziehung zumutbare Fahrwasserverhältnisse (Abb. 12 e).

6. Projektierungsperspektiven für Pumpspeicherung an Wasserstraßen

6.1. Wasserstraßen mit Laufkraftwerken

Die nachträgliche Einbindung von Pumpspeicherkraftwerken in gleichzeitig von Laufkraftwerken genutzte Wasserstraßen, von der bei den bisherigen bundesdeutschen Projekten mit Ausnahme von Geesthacht ausgegangen werden mußte, hat gezeigt, daß neben umfangreichen wasserbaulichen Sicherheitsmaßnahmen für die Schifffahrt unter Umständen schwerwiegende betriebliche Einschränkungen von seiten der Energiewirtschaft erforderlich sind. Bei der Beurteilung der Gesamtwirtschaftlichkeit eines solchen Vorhabens muß daher auch geprüft werden, ob die Aufwendungen für die Realisierung der bautechnischen Auflagen unter dem Gesichtspunkt der Häufigkeit des Auftretens der für die Schifffahrt kritischen Abflußzustände gerechtfertigt sind.

Ist die Energiewirtschaft aber bereit, durch Investitionen und betriebliche Einschränkungen Schwierigkeiten für das Transportsystem Wasserstraße/Schifffahrt abzubauen, dann sollte die Wasserverkehrswirtschaft bereit sein, zumutbare und vertretbare Einwirkungen auf den Schifffahrtsbetrieb unterhalb der Grenze der Beeinträchtigung der Sicherheit des Verkehrs zu akzeptieren. Das beiderseitige Entgegenkommen mit dem Ziel einer Kostensenkung könnte durch eine Reihe von Maßnahmen, von denen im folgenden nur einige angedeutet werden, wesentlich gefördert werden.

In erster Linie scheint es notwendig, die in 4.2 behandelten verschiedenen Richtwerte über Wasserspiegeländerungen und Strömungsgeschwindigkeiten unter Zugrundelegung des Strukturwandels der Binnenschifffahrtsflotte einer eingehenden wissenschaftlichen Untersuchung zu unterziehen und deren Ergebnisse in der Praxis zu erproben. Hierfür stehen in der Bundesrepublik Deutschland eine Reihe von fachspezifisch geeigneten Versuchsanstalten zur Verfügung. Eine Lockerung der bisherigen Sicherheitsbedingungen würde die Bewirtschaftung des gleichzeitig als Wasserstraße und Laufkraftoberwasser genutzten Unterbeckens erleichtern und damit seine energiewirtschaftliche Effizienz steigern.

Als Folge davon wären andererseits zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen für den fahrenden und ruhenden Verkehr zu treffen, die relativ geringe Aufwendungen erfordern. Der Schiffsführer darf beim Einfahren in eine als Unterbecken dienende Stauhaltung nicht unvorbereitet schwierige Fahrwasserbedingungen vorfinden. Deshalb könnten Signalanlagen, Fahrinnenmarkierungen und sichtbare Angaben über steigende oder fallende Tendenz der Wasserstände infolge des Pumpspeicherbetriebs als zusätzliche Navigationshilfen dem erweiterten Sicherheitsbedürfnis entsprechen. Eine Gefährdung des von den Auswirkungen der Pumpspeicherung noch mehr betroffenen ruhenden Schiffsverkehrs könnte dadurch vermieden werden, daß die Liegeplätze senkrechte Uferauffassungen erhalten und zusätzlich mit Schwimmpollern ausgerüstet werden. Aus der Tatsache, daß der beabsichtigten Einrichtung der Nachtschifffahrt und der Kontinuefahrt, die beeinträchtigt werden könnten, Grenzen gesetzt sind (14), sollte die Energiewirtschaft die Folgerung ziehen, die im Winter verkürzte Lieferzeit von nachts anfallendem Pumpstrom und die Wochenenden zu einer noch stärkeren Wasserentnahme aus der Stauhaltung auszunutzen. Erforderlichenfalls wäre das Unterbecken dann auch von anliegenden Schiffen freizuhalten.

Unabhängig von den dargelegten Möglichkeiten zur Verbesserung der kombinierten Nutzung einer Wasserstraße darf man nicht außer acht lassen, daß die Tendenz des weiterwachsenden Energieverbrauchs anhalten wird, daß sich aber an den verfügbaren Wassermengen einer vorgegebenen Stauhaltungsstrecke nichts ändern kann. Man wird also davon ausgehen müssen, daß die Bedeutung dieser für eine andere Art der Wasserkraftgewinnung programmierten Wasserstraßen als Unterbecken von Pumpspeicherwerken abnehmen wird, insbesondere soweit es sich um kleinere hydrologische Systeme handelt.

6.2. Ausweichlösungen

Im Zuge des steigenden Leistungsbedarfs an elektrischer Energie wird künftig in Kauf genommen werden müssen, daß die Stauhaltungen der Wasserstraßen mit Laufkraftwerken nur noch teilweise oder überhaupt nicht als Unterbecken mitbenutzt und dafür seitlich vom Fluß oder in Seitentälern zusätzliche geräumigere Unterbecken angelegt werden. Diese erhöhen zwar die Anlagekosten des Pumpspeicherwerks, haben aber den Vorteil, daß der Pumpspeicherbetrieb den Verkehr auf der Wasserstraße wenig oder überhaupt nicht beeinflußt. Eine derartige Tendenz ist vor allem deshalb bedauerlich, weil damit eine Beteiligung der Energiewirtschaft an der Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse im Rahmen einer wasserwirtschaftlichen Mehrzweckanlage immer problematischer wird. Die Abwanderung der Unterbecken aus den Flußwasserstraßen wird nicht aufzuhalten sein, solange diese nicht auch den Bedürfnissen der Pumpspeicherung weitgehend angepaßt werden. Als typische Beispiele für Ausweichlösungen dieser Art seien Planungen an der Mosel und am Main genannt.

Das bereits behandelte Unterwerk des Pumpspeicherwerks *Bremm* mit der Mosel-Stauhaltung *Fankel* als Unterbecken fördert nicht nur die für seine Eigenerzeugung (140 MW) erforderliche Pendelwassermenge, sondern versorgt auch das darüberliegende Hauptwerk mit einem Arbeitsinhalt von 50 Vollaststunden bei einer maximalen Leistung von 1390 MW (11). Dieses Langzeitpumpspeicherwerk hat ein Oberbecken von 125 Mio m³ Nutzinhalt, ein Speichervolumen, für das man an einer mitteleuropäischen Wasserstraße mit Laufkraftwerken wohl kein adäquates Unterbecken herstellen kann. Das Zwischenbecken, das dem Unterbecken als Oberbecken dient, faßt 30 Mio m³. Mit dem zwar von der Mosel gespeisten, aber den Schiffsverkehr nicht unmittelbar beeinflussenden Hauptwerk wird es möglich sein, den Forderungen nach größerer Leistung und größerem Arbeitsinhalt des Speicherbeckens zu entsprechen.

Für das am Main geplante Pumpspeicherwerk *Miltenberg*, das eine Leistung von 750 MW während 4,5 Stunden Vollast erbringen soll, kann das dafür erforderliche Unterbecken mit 4,5 Mio m³ Nutzinhalt ebenfalls nur seitlich vom Fluß, aber noch innerhalb des Hochwasserabflußquerschnitts errichtet werden. Die Füllung und Nachfüllung dieses Beckens erfolgt mit Main-Wasser. Seine Form, Lage und Gestaltung müssen auf den Hochwasserabfluß Rücksicht nehmen, nicht aber auf die Schifffahrt (16).

Am Main bei *Langenprozelten* wurde mit dem Bau eines Pumpspeicherwerks begonnen, das als Unterbecken ein vom Fluß völlig unabhängiges Nebental benutzt. Es sind zwei Ausbaustufen mit zwei aufeinanderfolgenden Unterbecken von 1,4 und 4,8 Mio m³ Nutzinhalt vorgesehen. Die in 4,5 Stunden mögliche Leistung beläuft sich auf 150/225 bzw. 750 MW. Das Kraftwerk und seine beiden Unterbecken haben mit der Wasserstraße *Europakanal* keine Berührung. Die erste Ausbaustufe ist ihr nur wirtschaftlich verbunden, weil die Erträge aus der Pumpspeicherung der Wasserstraßen-Finanzierung dienen (16).

6.3. Wasserstraßen ohne Laufkraftwerke

Nachdem die Möglichkeiten für den Bau weiterer Laufkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland teils erschöpft sind, teils aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr wahr-

genommen werden, ergibt sich die Notwendigkeit, die Stufenpläne für den kombinierten Ausbau und Umbau von Wasserstraßen unter dem Gesichtspunkt der Pumpspeicherung neu zu überdenken (17). Dies gilt nicht nur für die wenigen bisher noch nicht ausgebauten Flüsse. Auch die Haltungen von Schiffahrtskanälen, soweit sie hügeliges Gelände durchqueren, sollten in die Untersuchung einbezogen werden. Erst recht kann eine diesbezügliche Neuplanung bei den vorhandenen Wasserstraßen mit Stauregelung erfolgversprechend sein, bei denen die Frage der Erneuerung ihrer Laufkraftmaschinen ansteht oder eine Zusammenfassung mehrerer kleiner Stauhaltungen in eine einzige größere Haltung aus anderen Gründen vorgesehen ist. Allerdings sind die dafür in Betracht kommenden Möglichkeiten in der Bundesrepublik Deutschland begrenzt.

Das neue Planungskonzept einer auf Schifffahrt und Pumpspeicherung allein abgestellten Stauregelung könnte von einer Stufeneinteilung ausgehen, die unter Wahrung der Schifffahrtsinteressen an wenig besiedelten Talausweitungen besonders große Stauhaltungen vorsieht, welche die Forderungen der Energiewirtschaft nach größeren Unterbecken optimal erfüllen, und bei welchen der für die Sicherheit des Schiffsverkehrs notwendige Abflussausgleich jederzeit möglich ist. Zwar wird der Bedarf an kurzzeitig, d. h. an 4 bis 6 Stunden einsetzbarer Spitzenleistung durch den Zuwachs der im Bau befindlichen, nicht mit Wasserstraßen verbundenen Pumpspeicherkapazitäten für absehbare Zeit in ausreichendem Umfang gedeckt sein. Eine in die Zukunft gerichtete Planung umweltfreundlicher Stromerzeuger sollte aber doch an einigen dafür geeigneten Stromstrecken mit der Projektierung von das Unterbecken sparenden leistungsstarken Pumpspeicherwerken auf der Basis einer modifizierten, auf ihre Bedürfnisse zugeschnittenen Stauregelung beginnen, da die Kombination mit der Schifffahrt eine hervorragende multifunktionale Nutzung mit entsprechender Kostenzuordnung darstellt.

Wenn man bedenkt, in welchem Umfang die hydroelektrische Leistungsausbeute einer bisher von vielen Laufkraftwerken genutzten Wasserstraße durch künftig ganz wenige sie mitbenutzende Pumpspeicherkraftwerke in der Größenordnung von 700 MW nicht nur vervielfacht, sondern auch veredelt werden kann, so dürfte die wirtschaftliche Bedeutung der neuen Konzeption für die beiden Wasserwirtschaftszweige Schifffahrt und Wasserkraft außer Zweifel stehen. Das Pumpspeicherkraftwerk Säckingen, das größte bestehende Werk mit einer Unterbecken-Stauhaltung, entspricht mit seiner Leistung von 360 MW derjenigen von 6 Laufkraftwerken am Hochrhein. Mit allen 12 Hochrheinkraftwerken zusammen könnte etwa gerade die bei Neubauten anzustrebende Leistung eines einzigen Pumpspeicherkraftwerks erreicht werden. Die 70 Laufkraftwerke an Rhein, Main, Donau und Mosel mit zusammen 1280 MW sind nicht einmal in der Lage, die Leistung der beiden an Mosel und Donau geplanten 700-MW-Pumpspeicherwerke zu erbringen (siehe Tabelle in Abb. 7). Dabei ist die unterschiedliche Bewertung der inkonstanten Laufenergie gegenüber der jederzeit verfügbaren Spitzenenergie noch nicht berücksichtigt.

Der erste Schritt in Richtung einer Stauregelung ohne Laufkraftwerke nur für die Zwecke von Schifffahrt und hydraulischer Spitzenstromerzeugung wurde an der Elbe unternommen. Die Staustufe Geesthacht ist im übrigen auch die einzige, von der in der Bundesrepublik Deutschland bisher praktische Erfahrungen über das Zusammenspiel dieser beiden Nutzungen vorliegen. Nach übereinstimmenden Äußerungen der Schifffahrtsverwaltung und des Energieunternehmens sind nach mehr als 13jährigem Betrieb dieses Pumpspeicherwerks Beeinträchtigungen der Schifffahrt nicht bekanntgeworden. Allein schon diese Feststellung sollte den Wasserstraßenbau dazu ermutigen, die Nahtstelle Pumpspeicherwerk — Wasserstraße unter neuen Gesichtspunkten zu festigen.

Schrifttumsverzeichnis

- [1] BASSLER, F.: Die Schluchseekraftwerke Häusern, Witznau und Waldshut. Schweiz. Techn. Zeitschrift (1954) Heft 29/30
- [2] BRANDENBURG, C.: Der Bau des Pumpspeicherkraftwerks Geesthacht. Die Bau-technik (1956) Heft 9
- [3] BOHLER, K.: Strom aus der Mosel für den Verbund. Zeitschrift RWE-Verbund (1960) Heft 29
- [4] BASSLER, F.: Entwicklungstendenzen der Stauregelung an Rhein und Rhone. Die Wasserwirtschaft (1961) Heft 8
- [5] PFISTERER, E.: Wasserkraftanlagen im Südschwarzwald und am Hochrhein. Die Wasserwirtschaft (1963) Heft 5
- [6] KRAUSE, M./REUTER, F.: Die Staustufe Geesthacht, Entwurf und Ausführung. Die Wasserwirtschaft (1963) Heft 4, 7, 9, 10 und 11
- [7] LENNSEN, G.: Development of the Moselle for navigation and power. 8. Internat. Kongreß für Große Talsperren 1964, Bericht C. 3
- [8] PRESS, H.: Talsperren, Wasserkraft- und Pumpspeicherwerke in der Bundesrepublik Deutschland. Verlag W. Ernst & Sohn Berlin 1967
- [9] FUCHS, H.: Flußbau und Wasserkraftbau. Aus Baubericht 1968 der Rhein-Main-Donau AG München
- [10] PFISTERER, E./KUHLMANN, K. H.: Operating the Säckingen underground pumped-storage station. Water Power Nov. 1970
- [11] GROSSHEIMANN, K. J.: Das Langzeitpumpspeicherwerk Bremm/Mittelmosel. Studie der Moselkraftwerke GmbH Andernach, April 1971
- [12] MÜLLER, J.: Auswirkungen eines Unterbeckens für Pumpspeicherung auf die Wasserwirtschaft. Mitt. des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Techn. Hochschule Darmstadt (1971) Heft 7
- [13] ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als SchiffsstraÙe. Mitt. des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover (1971) Heft 36
- [14] RÜMELIN, B.: Neue Perspektiven der WasserstraÙenpolitik in der Bundesrepublik Deutschland. Zeitschrift für Binnenschiffahrt und WasserstraÙen (1972) Heft 1
- [15] STAUDER, H./GEHRIG, W.: Modelluntersuchungen für das Pumpspeicherwerk Bremm/Mosel. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (1972, nicht veröffentlicht)
- [16] FUCHS, H./BAUER, L.: Pumpspeicherwerke am Europakanal Rhein-Main-Donau. Österr. Wasserwirtschaft (1972) Heft 7
- [17] BASSLER, F.: Economic integration of pumped storage plants in navigable waterways. United Nations ECE-Symposium on hydroelectric pumped storage schemes Athens/Greece (November 1972), Report Group A.