

## Der Schwellbetrieb der Flußkraftwerke

Von Regierungsbaumeister Dr.-Ing. Karl FELKEL

### 1. Energiewirtschaftliche Grundlagen

Beziehen wir die elementare Gleichung: "Arbeit ist Kraft mal Weg" auf Wasserkräfte, so wird hier die Kraft verkörpert durch das Gewicht der Wassermenge und der Weg durch die vorhandene Fallhöhe. Durch das natürliche Angebot dieser beiden Größen ist, bei Berücksichtigung des sich bei der Umwandlung in nutzbare Energieformen zwangsweise einstellenden Wirkungsgrades, die in einem bestimmten Zeitabschnitt zur Verfügung stehende Arbeit festgelegt. Der veränderliche Energiebedarf bestimmt die Forderung nach einer entsprechenden Verteilung des natürlichen Dargebots auf die einzelnen Abschnitte dieses Zeitraumes und somit nach einer Änderung der Leistung  $N$  als Funktion der Zeit. In der Gleichung

$$N = \eta \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

erscheint nur die sekundlich genutzte Wassermenge  $Q$  innerhalb der durch die baulichen Gegebenheiten der Anlage und den natürlichen Zufluß festgelegten Grenzen als unabhängige Veränderliche, während die Fallhöhe  $H$  und der Wirkungsgrad  $\eta$  von dieser und der Zeit abhängig sind und nicht beliebig verändert werden können. Somit sind wir bei dem Bestreben, mit dem Angebot dem wechselnden Leistungsbedarf zu folgen, auf die Veränderung der sekundlichen Betriebswassermenge beschränkt.

Da der natürliche Zufluß während kurzer Zeiten nahezu gleich bleibt, setzt seine Umwandlung in eine veränderliche Betriebswassermenge das Vorhandensein eines Speicherraumes voraus. Während jedoch die durch geringen Zufluß bei großen Fallhöhen gekennzeichneten Hochdruckanlagen durchwegs mit großen Speicherbecken ausgestattet und somit zu einer weitgehenden Veränderung der Beaufschlagung jederzeit befähigt sind, besitzen die Niederdruckwerke unserer Flüsse

diese Fähigkeit nur in geringem Maße. Die Speicherung ihrer großen Zuflußwassermengen über einen längeren Zeitabschnitt würde zu unwirtschaftlich großen Speicherräumen führen, weshalb diese Anlagen in der Vergangenheit größtenteils als reine Laufwerke betrieben wurden in der Weise, daß der Zufluß nicht zurückgehalten, sondern gleichmäßig verarbeitet wurde. Dies jedoch führte zu einem Überangebot in Zeiten mangelnden Bedarfs (nachts), während z.Zt. der Bedarfsspitzen bedeutende Ergänzungsleistungen zur Verfügung stehen mußten.

Beschränken wir uns beim Betrieb von Flußkraftwerken auf die Veränderung der Betriebswassermengen innerhalb kurzer Zeitabschnitte, wie sie in der Periodizität der Bedarfsspitzen innerhalb eines Tages in Erscheinung treten, so sind die Stauräume der Werke meist wohl in der Lage, während einiger Stunden die zur Leistungssteigerung benötigten zusätzlichen Wassermengen zu liefern, die sie in den darauffolgenden Stunden geringeren Bedarfs durch Verminderung der Beaufschlagung zurückerhalten. Die durch die dabei auftretende Absenkung des Oberwassers verlorengelassene Fallhöhe mindert die erzielte Gesamtarbeit. Die zeitliche Verlagerung des Energieangebotes entsprechend den Anforderungen des Bedarfs bewirkt also eine Gütesteigerung der Energie auf Kosten der Menge.

Für die hier angedeutete Form des Einsatzes von Niederdruckwerken wurde der Ausdruck Schwellbetrieb geprägt. Erstreckt er sich auf eine zusammenhängende Werkskette, so wird von Durchlaufspeicherung gesprochen. Nachdem bereits 1917 die Anwendungsmöglichkeit dieser Betriebsform für den kanalisiertes Neckar von Ludin (17) untersucht wurde, gelangte sie in Deutschland erstmalig bei den Kanalkraftwerken der Mittleren Isar AG. (Baujahr 1919 - 1925) und den Illerstufen der Oberschwäbischen Elektrizitätswerke (OEW) (Baujahre 1919 - 1928) in Form eines Tagesspeicherbetriebes zur Anwendung. Für eine planmäßige Durchlaufspeicherung wurden des weiteren die Lech- und Illerstufen der Bayerischen Wasserkraftwerke AG., sowie in Österreich die Werke an der Enns und der Drau ausgebaut. Auch im Rahmen des Ausbaues der Mosel sind Untersuchungen über die zweckmäßigste Durchführung des Schwellbetriebes im Gange.

Der Schwellbetrieb gestattet im Rahmen des Stauraumvolumens und des natürlichen Zuflusses sowie der Ausbaugrößen des Werkes unendlich viele Möglichkeiten des Einsatzes sowohl in Bezug auf die Leistungshöhe als auch auf die zeitliche Aufeinanderfolge. Er ist bei allen Wasserführungen, die die Schluckfähigkeit der Turbinen unterschreiten, möglich.

Es wird anzustreben sein, Betriebspläne der größten Wirtschaftlichkeit für die verschiedenen Wasserdarbietungen von vornherein auszuarbeiten und bereitzustellen, an Hand derer der Betriebsleiter eines Werkes oder einer Werksgruppe beim Eintreffen der täglichen Betriebsberichte sofort die Entscheidung über den zweckmäßigsten Einsatz der Werke treffen kann.

Entsprechend dem im Ablauf des Tages schwankenden Verhältnis von Bedarf und Dargebot ändert sich auch die im Marktpreis zum Ausdruck kommende Wertigkeit des elektrischen Stromes. Spitzen- und Tagesenergie wird höher bewertet als Nachtenergie. Das Hauptziel des Schwellbetriebes wird nun darin liegen, den Betriebsverlauf so zu gestalten, daß der Gesamterlös aus der gewonnenen Energie ein Maximum ergibt.

## 2. Formen des Schwellbetriebes

Der Schwellbetrieb kann sowohl in einem einzelnen Werk als auch in einer Kette aufeinanderfolgender Werke durchgeführt werden.

### 2.1 Der Betrieb eines einzelnen Werkes

Ist er auf ein einzelnes Werk beschränkt, so setzt dies voraus, daß es im Hinblick auf die Unterlieger gestattet ist, durch die Speicherung den Abfluß in seiner Tagesganglinie gegenüber dem natürlichen Zufluß zu verändern.

Es wurden rechnerische und graphische Verfahren entwickelt (1, 5, 13, 14, 15), die unter Zusammenfassung der hydraulischen und energiewirtschaftlichen Einflüsse denjenigen Betriebsverlauf angeben, der bei einem bestimmten Werteverhältnis des elektrischen Stro-

mes während der einzelnen Tageszeiten den maximalen Markterlös ergibt. Denn da sich, wenn die Beaufschlagung eines Werkes seinen Zufluß übersteigt, seine Stauhaltung absenkt und somit seine Fallhöhe verringert, so wird die während einer bestimmten Stundenzahl erreichbare Energieausbeute keineswegs immer dann am größten sein, wenn die Beaufschlagung so groß wie nur möglich gewählt wird, vielmehr kann der optimale Betriebsverlauf nur unter Berücksichtigung aller in Frage kommenden Faktoren erreicht werden.

Der Betrieb des einzelnen Werkes kann nun so vor sich gehen, daß dieses jeweils eine Zeit des Tages über entweder mit gleichbleibender Beaufschlagung oder mit gleichbleibender Leistung fährt oder aber nach einem beliebigen Programm.

2.1.1 Beim Betrieb mit zeitweise konstanter Beaufschlagung, der z.B. bei der Durchlaufspeicherung für das oberste Werk einer den erhöhten Abfluß gleichzeitig verarbeitenden Werkskette zweckmäßig sein kann, vermindert sich während der Schwellperiode die Leistung des Werkes dauernd, da infolge der Inanspruchnahme des Speicher- raumes der Oberwasserspiegel absinkt und somit die Fallhöhe geringer wird. Arbeitet ein Werk eine Anzahl von Stunden über mit einer gleichbleibenden, den natürlichen Zufluß übersteigenden Beaufschla- gungswassermenge, so gibt es für diese einen bestimmten Wert, bei dem während der betrachteten Zeit die größte Arbeit erzielt wird. Wird die Beaufschlagung über diesen Wert hinaus erhöht, so verringert sich die Energieausbeute.

2.1.2 Beim Betrieb mit konstanter Leistung muß während der Schwell- periode infolge der laufenden Verringerung der Fallhöhe die Beauf- schlagung ständig vergrößert werden. Die durch eine Absenkung um ein festgelegtes Maß innerhalb eines Zeitraumes zur Verfügung stehen- de Wasserfülle ergibt im allgemeinen nicht dann die größte Energie- ausbeute dieses Zeitraumes, wenn sie gleichmäßig über ihn verteilt wird, sondern es ist günstiger, gegen Ende des Zeitraumes mehr Was- ser zuzusetzen als zu Beginn, denn in diesem Falle kann möglichst

lange mit einer größeren Fallhöhe gefahren werden. Dementsprechend ist beim Abarbeiten der Haltung der Betrieb mit konstanter Leistung demjenigen mit konstanter Beaufschlagung überlegen.

2.1.3 Beim Betrieb nach einem beliebigen Bedarfsdiagramm ist aus dem gleichen Grunde unter der Voraussetzung, daß der Tagstrom höher bewertet wird als der Nachtstrom, ein höherer Einsatz im Schwellbetrieb arbeitender Niederdruckwerke zur Zeit der Abendspitze zweckmäßig. Ausgesprochen ungünstig hingegen wirkt sich aus dem oben angeführten Grunde eine überdurchschnittliche Erhöhung der Leistung in den Morgenstunden auf die Energiebilanz aus.

## 2.2 Die Durchlaufspeicherung einer Werkskette

Mit Durchlaufspeicherung (Abb. 1) bezeichnen wir bei einer Kette von Niederdruck-Wasserkraftanlagen eine Betriebsform, bei

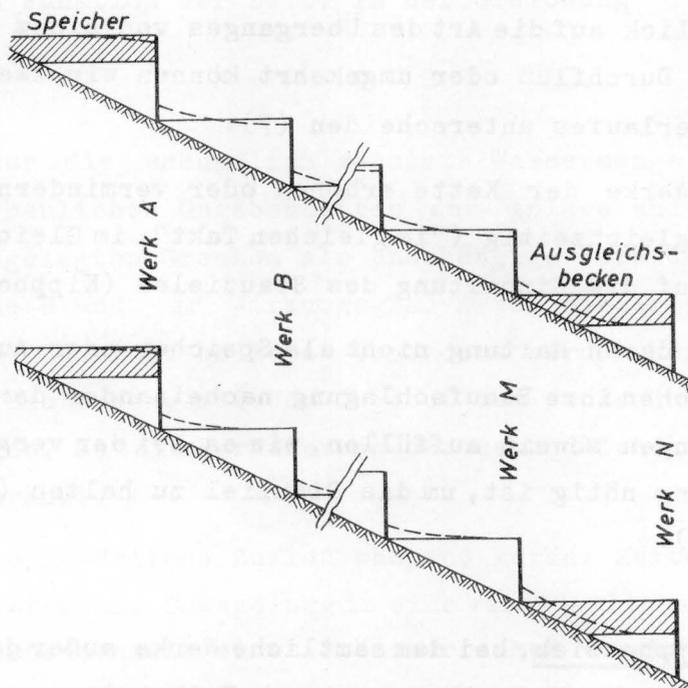


Abb.1 Schematische Darstellung der Durchlaufspeicherung. Kippbetrieb (oben) und Einhaltung des Stauziels infolge gestaffeltem Hochfahrens (unten)

der die Haltung des obersten Werkes als Hauptschwellbecken dient, aus dem während der Stunden des erhöhten Energiebedarfs Zusatzwasser zum natürlichen Zufluß beigegeben wird, wodurch sämtliche Werke außer dem untersten, das den natürlichen Durchfluß wieder herstellt, zu erhöhter Leistung befähigt werden.

Während der Stunden geringeren Bedarfs wird ein Teil des natürlichen Zuflusses in der obersten Haltung zurückgehalten, um in der neuen Schwellperiode zur Verfügung zu stehen. Als Speicher und als Ausgleichsbecken können bei einer aus einer größeren Anzahl von Werken bestehenden Kette auch je zwei Haltungen herangezogen werden. Die wirtschaftlichste Form der Durchlaufspeicherung kann dann erreicht werden, wenn die Werksstaffel nach einem einheitlichen Plan errichtet wurde, bei dem die Ausbaugrößen der einzelnen Werke aufeinander abgestimmt wurden. Des weiteren ist es erwünscht, daß sämtliche Anlagen in das gleiche Netz arbeiten, weil dann erhöhte Belastungsanforderungen an alle Werke zu gleicher Zeit gestellt werden.

Im Hinblick auf die Art des Überganges von einem niederen auf einen höheren Durchfluß oder umgekehrt können wir zwei Grenzfälle des Betriebsverlaufes unterscheiden (7):

1. Sämtliche Werke der Kette erhöhen oder vermindern ihre Beaufschlagung gleichzeitig ("im gleichen Takt", im Gleichgang) unter Verzicht auf die Einhaltung des Stauzieles (Kippbetrieb).
2. Die Werke, deren Haltung nicht als Speicher oder Ausgleichsraum dient, erhöhen ihre Beaufschlagung nacheinander derart, daß sich ihre Haltungen soweit auffüllen, wie es bei der vergrößerten Beaufschlagung nötig ist, um das Stauziel zu halten (gestaffeltes Hochfahren).

2.2.1 Beim Kippbetrieb, bei dem sämtliche Werke außer dem untersten, das den Ausgleich des Durchflusses durch Beibehaltung einer gleichmäßigen Betriebswassermenge herbeiführt, ihre Beaufschlagung gleichzeitig ändern, bleibt das Wasservolumen der einzelnen Zwischenhaltungen theoretisch bei allen Betriebszuständen gleich groß. Findet überhaupt kein Durchfluß statt, so stellt sich der Wasserspiegel waagrecht in Höhe des Stauzieles ein. Da mit der Durchflußmenge das

erforderliche Fließgefälle wächst, der Wasserinhalt der Haltung aber, da jederzeit gleich viel entnommen wird wie zufließt, konstant bleibt, so muß der Wasserspiegel am unteren Ende der Haltung absinken und am oberen ansteigen und somit um eine noch zu untersuchende Achse kippen. Während und kurz nach dem Übergang von einer Beaufschlagung auf eine andere sind die Fließvorgänge in der Haltung nicht stationär. Während mit dem Einsetzen einer höheren Beaufschlagung unmittelbar oberhalb des Kraftwerkes ein Sunk entsteht, der mit Wellenschnelligkeit aufwärts wandert, tritt unterhalb des Kraftwerkes ein sich abwärts bewegendes Schwall auf. Beide eilen einander entgegen, wobei ein größeres Wasserspiegelgefälle in der Haltung entsteht und deren gesamte Wassermenge beschleunigt wird (vgl. (10)). Die Schwall- und Sunkwellen werden an den Haltungsenden reflektiert und klingen ab, womit ein neuer stationärer Fließzustand in der Haltung entstanden ist. Der umgekehrte Vorgang tritt beim Übergang von einer größeren zu einer geringeren Beaufschlagung auf. Um nun den Verlauf desjenigen stationären Stauspiegels bei einem Durchfluß  $Q_2$  zu ermitteln, der den gleichen Staurauminhalt ergibt wie derjenige bei einem anderen Durchfluß  $Q_1$ , müssen wir für  $Q_2$  für mehrere Wasserspiegelhöhen an der Wehrstelle die Staulinien zeichnen und unter diesen diejenigen aussuchen, die keine Veränderung des Staurauminhaltes gegenüber dem beim Durchfluß  $Q_1$  herrschenden Zustand ergibt, bei der also die Abnahme  $V_u$  im unteren Staubereich gerade der Zunahme  $V_o$  im oberen Staubereich entspricht (Abb. 2). Auf diese Weise sind wir in der Lage, die beim Kippbetrieb auftretenden Fließverluste zu ermitteln. Als Ausgangswasserspiegellage werden wir zweckmäßigerweise diejenigen wählen, die sich beim kleinsten in Frage kommenden Durchfluß  $Q_{min}$  und eingehaltenen Stauziel einstellt, denn durch sie ist das konstante Volumen der Haltung bestimmt. Findet zeitweise kein Durchfluß statt, so ist das unter der Horizontalen in Stauzielhöhe vorhandene Wasservolumen auch bei anderen Durchflüssen vorhanden.

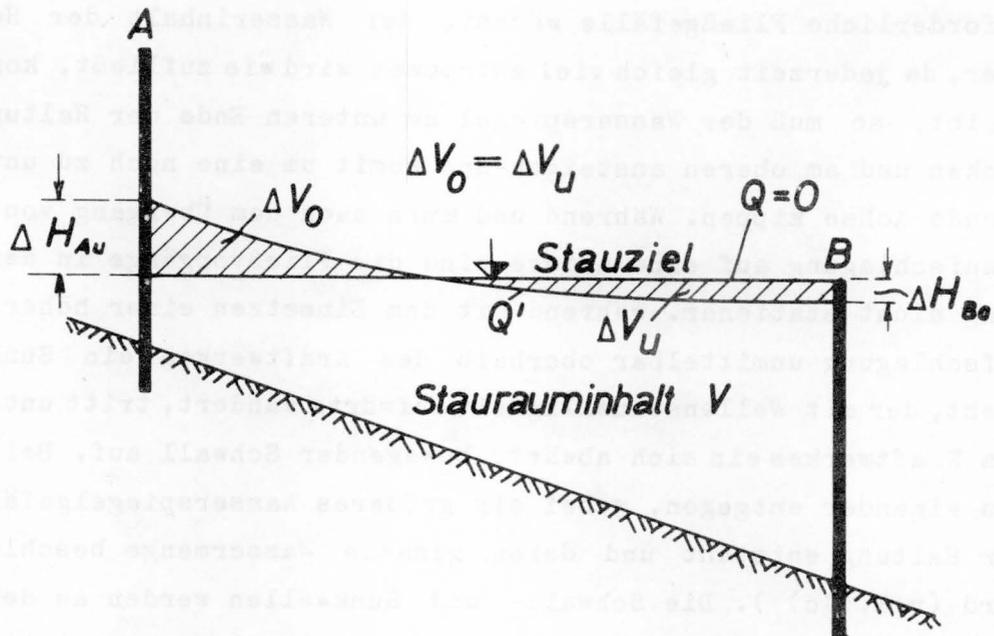


Abb. 2 Die Verhältnisse innerhalb einer Zwischenhaltung beim Kippbetrieb

2.2.2 Der Betrieb unter Einhaltung des Stauzieles. Der im vorangegangenen Abschnitt behandelte Kippbetrieb stellt zwar die betrieblich einfachere Form der Durchlaufspeicherung dar, ist jedoch mit um so größeren Fließverlusten verbunden, je kleiner die Fließquerschnitte sind. Aus diesem Grunde ist eine Untersuchung darüber angebracht, wie groß der zu erwartende Fallhöhengewinn ist, wenn das Stauziel der einzelnen Werke auch bei den vergrößerten Durchflussumengen eingehalten wird. Diese Einhaltung des Stauzieles ist dann möglich, wenn die Erhöhung der Beaufschlagung nicht in sämtlichen Werken der Kette gleichzeitig vorgenommen wird, sondern wenn diese nacheinander von oben nach unten ihren Durchfluß vergrößern. Es wird demnach neben der Verminderung der Fließverluste die für das gestaffelte Hochfahren erforderliche Zeit zu ermitteln sein.

Die Verminderung der Fließverluste und somit der Fallhöhengewinn kann der Gegenüberstellung der in beiden Betriebsfällen zu erwartenden Wasserspiegellagen entnommen werden. Um die Zeit zu erhalten, um die das untere Werk später als das obere die Beauf-

schlagung vergrößern muß, wird die Differenz  $\Delta V$  der in beiden Betriebsfällen auftretenden Haltungsverolumina durch die Durchflußvergrößerung  $\Delta Q$  zu teilen sein.

In Deutschland wird im Neckar, an der Isar sowie der oberen Iller reiner Kippbetrieb durchgeführt. Die EVS-Werke der mittleren Iller werden je nach Bedarf entweder gleichzeitig oder gestaffelt hochgefahren. Die meisten Lechwerke der Bayerischen Wasserkraftwerke AG. erhöhen ihre Beaufschlagung gestaffelt in Abständen von 10 Minuten.

### 3. Hydraulische Probleme des Schwellbetriebes

Beim Schwellbetrieb treten hauptsächlich nicht stationäre Fließvorgänge auf und zwar interessieren einmal die infolge von Durchflußänderungen auftretenden Schwall- und Sunkwellen, zum anderen die Wasserspiegellagen beim kontinuierlichen Füllen oder Entleeren einer Stauhaltung, denn sie ergeben die Ganglinien der Ober- und Unterwasserstände am Werk und somit die Fallhöhen als Funktion der Zeit.

#### 3.1 Schwall- und Sunkwellen

Während nun die Berechnung von Schwall und Sunk in der Literatur ausführlich behandelt ist (z.B.(9), daselbst zahlreiche weitere Literaturangaben,(10) ), fehlte es bislang an Untersuchungen über das Verhalten des Wasserspiegels beim kontinuierlichen Füllen oder Entleeren einer Stauhaltung, weshalb nur auf diese Aufgabe kurz eingegangen werden soll (vgl.(8) ).

#### 3.2 Das kontinuierliche Leeren und Auffüllen einer Stauhaltung

Betrachten wir z.B. ein Stadium des mehrere Stunden andauernden Leerens einer übergreifend ausgebauten Stauhaltung, wobei also der Abfluß aus der Haltung größer ist als der Zufluß in sie. Der Wasserspiegel sinkt hierbei als Funktion der Zeit ab und besitzt eine Form, die keine stationäre Staukurve ist, obwohl sie dieser ähnelt, denn es fließt durch einen jeden Querschnitt eine andere

Wassermenge, deren Größe wir, mit Ausnahme derjenigen des Anfangs- und Endquerschnittes, zunächst nicht kennen. Nehmen wir jedoch in erster Annäherung an, daß der Durchfluß längs der Stauhaltung linear vom Zufluß  $Q_z$  auf den Abfluß  $Q_a$  ansteige und zeichnen diese Durchflußverteilung über dem Längenprofil der Stauhaltung auf, so können wir, von verschiedenen Wassertiefen am Wehr ausgehend, die der angenommenen Durchflußverteilung entsprechenden nicht stationären Staukurven einzeichnen (Abb.3).

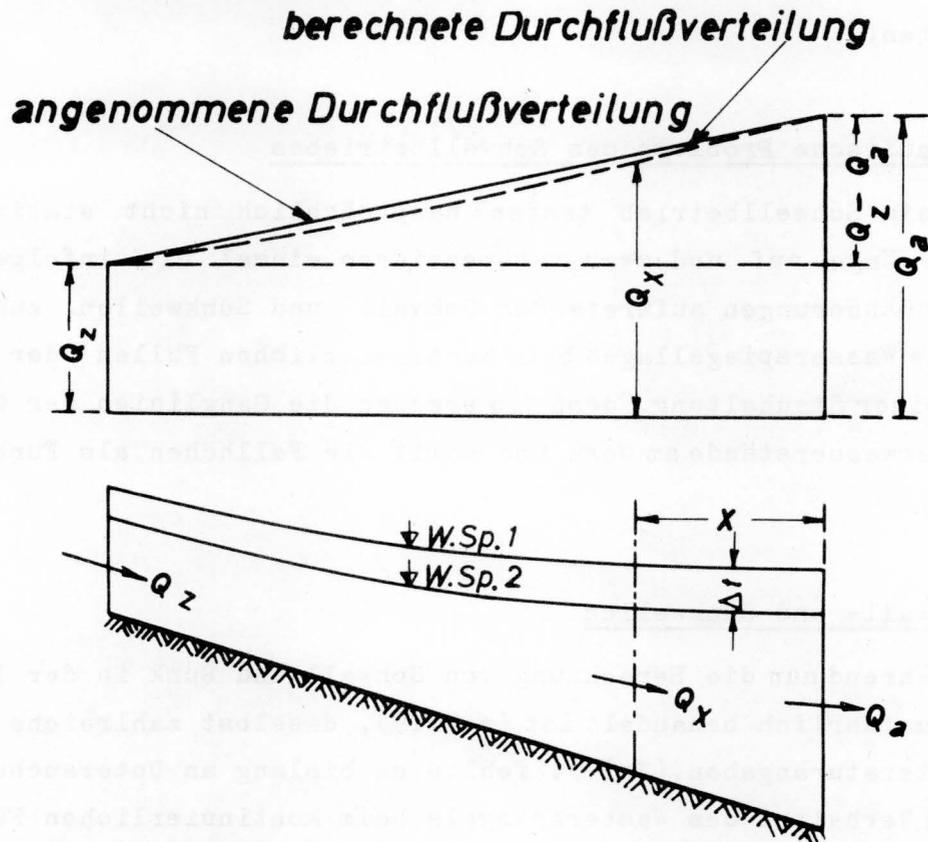


Abb. 3 Linien der Durchflußverteilung (oben) und Wasserspiegel-längenprofile (unten) beim Entleeren einer Stauhaltung (schematisch)

Die Zeitdauer  $T$ , innerhalb der der Übergang von einer Wasserspiegellage zur nächsten erfolgt, beträgt

$$T = \frac{\Delta t_m \cdot B \cdot L}{Q_a - Q_z} \quad (2)$$

wenn  $\Delta t_m$  die mittlere Wasserspiegelabsenkung,  $B$  und  $L$  mittlere Breite bzw. Länge der Stauhaltung bedeuten.

An einem beliebigen Punkt des Längsprofils mit dem Abstand  $x$  vom unteren Wehr fließt somit je Sekunde vorbei

$$Q_x = Q_a - \frac{\Delta t \cdot B \cdot x}{T} \text{ (m}^3\text{/s)}. \quad (3)$$

Mit Hilfe der Gleichung (3) können wir nun eine berichtigte Linie der Durchflußverteilung längs der Haltung berechnen, die als Grundlage für das Zeichnen der Wasserspiegellage 2 in 2. Annäherung dient. Damit werden wir im allgemeinen eine hinreichende Übereinstimmung zwischen den angenommenen und den im Ergebnis erscheinenden Werten erreicht haben, andernfalls ja jede Wiederholung des geschilderten Vorganges eine weitere Näherung an den tatsächlichen Zustand bedeutet.

#### 4. Der Einfluß des Schwellbetriebes auf die Gestaltung der wasserbaulichen Anlagen

Die Durchlaufspeicherung ist sowohl bei Kanal- als auch bei Flußkraftwerken durchführbar, doch sind die letzteren dabei insoweit überlegen, als bei ihnen infolge ihrer großen Fließquerschnitte die beim vergrößerten Durchfluß auftretenden zusätzlichen Fließverluste wesentlich geringer sind. Außerdem werden die Flußkraftwerke in der Regel auf eine relativ höhere Ausbauwassermenge  $Q_T$  ausgelegt sein, während bei Kanalkraftwerken durch den bedeutenden Kostenanteil für die Gerinneherstellung die wirtschaftliche Höhe von  $Q_T$  heruntergedrückt wird. An je weniger Tagen des Jahres aber der natürliche Zufluß die Ausbauwassermenge überschreitet, an desto mehr Tagen und um so intensiver läßt sich der Schwellbetrieb verwirklichen.

Durch die Höhenlage des Turbineneinlaufes im Oberwasser bzw. der Saugschlauchausmündung im UW ist der Umfang der beim Schwellbetrieb möglichen Absenkungen baulich festgelegt. Handelt es sich um einen schiffbaren Fluß, so ist die Sohle in der gesamten Schiffsfahrtsrinne unter Berücksichtigung der Sunkwellen so tief zu legen, daß die erforderliche Schiffsahrtstiefe jederzeit gewährleistet ist. Wird im oberen Teil der Stauhaltung die Sohle durch Ausbaggern vertieft, sodaß sie hier ein sehr flaches oder nahezu gar kein

Gefälle mehr besitzt, so nimmt bei größeren Durchflüssen der Wasserspiegel über ihr die Gestalt einer Absenkkurve an, deren tiefster Punkt über dem Sohlenknickpunkt P (vgl. Abb.4) liegt. Am Punkt P tritt somit die geringste Wassertiefe der Haltung auf, sodaß den Tiefen bzw. der Sohlensausbildung an dieser Stelle in Flüssen mit Schifffahrt und Schwellbetrieb besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muß.

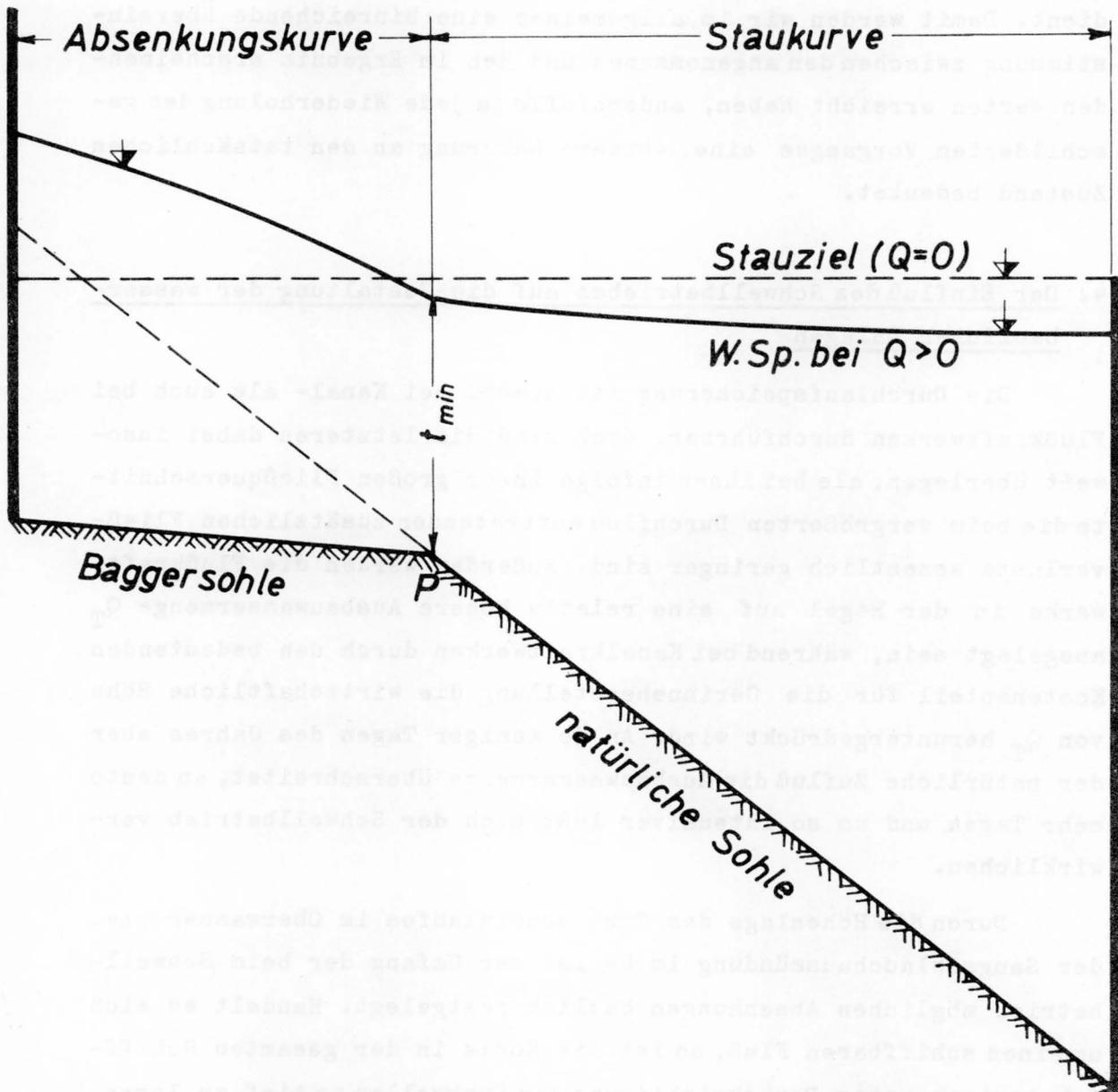


Abb. 4 Die geringste Wassertiefe in einer Zwischenhaltung mit Sohlenbaggerung

Im Bereiche der täglichen Wasserspiegelschwankungen sind die Ufer durch Befestigung bzw. Verbesserung des Böschungswinkels vor nachteiligen Angriffen zu schützen. Rutschgefährdete Streifen können durch Anpflanzungen, die gleichzeitig zur Verschönerung des Landschaftsbildes beitragen, gesichert werden. Da der Flußwasserspiegel u.U. schneller absinkt als das im Erdkörper angestiegene Wasser, muß für die Möglichkeit eines raschen Ausgleiches gesorgt werden oder andernfalls der Böschungsbelag für dammseitigen Überdruck bemessen werden. In diesem Zusammenhang muß auch auf die Gefahr schädlicher Setzungen von ufernahen Bauwerken infolge des Ausschwemmens des Feinkornes aus dem Boden hingewiesen werden. Eine weitere Auswirkung des Schwellbetriebes kann in der Verzögerung der Selbstdichtung der neuerstellten Dämme bestehen.

Wird der Schwellbetrieb auch während Frostperioden durchgeführt, so besteht die Gefahr einer Uferbeschädigung durch die Bewegung der Eisdecke.

##### 5. Die Auswirkungen auf die Schifffahrt

Die Vorteile des Schwellbetriebes für die Energieerzeugung liegen auf der Hand, während er für die Schifffahrt eine gewisse Gefahrenquelle bedeutet. Eine Gefährdung der Schifffahrt tritt auf, wenn die erforderliche Wassertiefe an irgendeiner Stelle der Fahrinne unterschritten wird. Da die seichtesten Stellen sich i.a. im UW-Kanal in der Nähe des Turbinenauslaufes befinden, ist beim Schwellbetrieb auch der Stand des UW-Pegels zu beobachten. Bei Beginn und während des Schwellbetriebes ist die Gefahr nicht groß, da das UW durch die erhebliche Steigerung des Durchflusses ansteigt. Die Hauptgefahr für die Schifffahrt geht von dem beim Zurückfahren auf Grundlast im UW entstehenden Absperrsunk aus. Hierbei wird die Abflußmenge kleiner, während das vor der Sunkfront in rascher Bewegung befindliche Unterwasser infolge seines größeren Fließgefälles rasch abläuft und der UW-Stand stark absinkt. Um dies zu vermeiden, dürfen die Turbinen nicht rasch entlastet werden.

Das Schwellbetriebsprogramm soll der Schifffahrt bekannt gegeben werden.

Am kanalisierten Neckar, wo jahrelange Erfahrungen mit bei reger Schifffahrt durchgeführtem Schwellbetrieb vorliegen (11), sind bisher keine durch diesen verursachten Schiffsschäden bekannt geworden.

#### 6. Auswirkungen auf die Fischerei

Ein Großteil der in unseren Flüssen lebenden Fischarten sind Krautlaicher, d.h. sie streifen ihren Laich an den meist im Uferbereich anzutreffenden Wasserpflanzen ab. Hierin liegt beim Schwellbetrieb die Gefahr für ihre Fortpflanzung, denn der Laich stirbt, wenn er ins Trockene gelangt, ab. Da beim Schwellbetrieb durch die tägliche Absenkung des Haltungswasserspiegels gerade die als Laichplätze geeigneten flachen und pflanzenbestandenen Uferstreifen immer von neuem trocken fallen, ist hierbei die natürliche Fortpflanzung der Krautlaicher äußerst gefährdet, sodaß u.U. ihr Bestand durch künstliche Brut und Besatz mit Jungfischen gesichert werden muß, sofern es nicht möglich ist, durch das Anlegen von Grundschwellen das Wasser in den als Brutstätten geeigneten Uferzonen auch bei abgesenktem Haltungsspiegel zurückzuhalten.

Es sei noch eine weitere Schädigung der Fischerei durch den Schwellbetrieb erwähnt, die darin besteht, daß bei fallendem Wasser an den Rändern der Haltung u.U. einzelne verbindungslose Pfützen entstehen. Darin zurückgebliebene Fische werden eine leichte Beute von Fischdieben und Vögeln.

#### 7. Wasserbauingenieur und Schwellbetrieb

Die Durchführung des Schwellbetriebes ist in erster Linie eine Aufgabe der Betriebsleiter der Kraftwerke und somit von Ingenieuren des Maschinenbau- oder Elektrofaches. Es gehen von ihm jedoch zahlreiche Einflüsse auf die Gestaltung, die Unterhaltung und den Betrieb der Wasserstraßen bzw. Flußläufe aus und deshalb ist diese Betriebsform auch für die Arbeiten des Bauingenieurs von Bedeutung.

Schrifttum

1. Bauer, E. Das Niederdruck-Schwell-Wasserkraftwerk im Energieverbundnetz mit Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Maschinenbau und Wärmewirtschaft 2(1949), S. 35-41.
2. Böhmler Steigerung der Wasserkraftausnutzung an Flüssen durch die Anlage eines einzigen Tagesspeichers oberhalb der am weitesten flußaufwärts gelegenen Wasserkraftanlage. Der Bauingenieur 1(1920) S. 523.
3. Christaller, H. Der Schwellbetrieb bei Laufwasserkräften. Elektrizitätswirtschaft 51(1952) S. 654-656.
4. Clausnitzer, R. Der Schwellbetrieb in Flußkraftwerken, seine Möglichkeiten und Vorteile. Die Wasserwirtschaft 42(1952) S. 342-347.
5. Felkel, K. Über die Aufstellung der wirtschaftlichsten Fahrpläne für im Schwellbetrieb arbeitende Niederdruck-Wasserkraftanlagen. Elektrizitätswirtschaft 56(1957) S. 531-534 und 558-562.
6. Felkel, K. Biologische Auswirkungen von Stauhaltungen. Das Gas- und Wasserfach 98(1957) S. 650-651.
7. Felkel, K. Vergleichende Gegenüberstellung von Kippbetrieb und gestaffeltem Hochfahren bei der Durchlaufspeicherung von Flußkraftwerken. Die Wasserwirtschaft 47(1957) S. 310-313.
8. Felkel, K. Die Berechnung der nicht stationären Fließbewegung des Wassers in offenen Gerinnen. Die Bautechnik 35(1958) S. 216-223.
9. Frank, J. Nichtstationäre Vorgänge in den Zuleitungs- und Ableitungskanälen von Wasserkraftwerken. 2. Aufl., Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1957.
10. Frank, J. Hydraulik der Durchlaufspeicherung. Der Bauingenieur 28(1953) S. 39-44 und 87-91.
11. Gamer Erfahrungen bei dem Bau und Betrieb von Laufwasserkraftwerken mit Schwellbetrieb an der Neckar-Kraftwasserstraße. Die Wasserwirtschaft 43(1953) S. 113-123.

12. Hirt, M. u. Wiedler, K. Technische Mittel zur Verminderung von Schwall und Sunk bei Flußkraftwerken. Schweizerische Bauzeitung 75(1957) S.327-332.
13. Hutarew, G. Schwellbetrieb von Wasserkraft-Laufwerken. Maschinenbau und Wärmewirtschaft 2 (1947) S. 97-102.
14. Hutarew, G. Zur Frage der Wirtschaftlichkeit des Schwellbetriebes. Maschinenbau und Wärmewirtschaft 3 (1948) S. 127-130.
15. Hutarew, G. Graphische Ermittlung von Betriebsfahrplänen, insbesondere für den Schwellbetrieb. Österr.Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft 2(1949) S. 253-255.
16. Lautensach, H. Die Wirtschaftlichkeit des Speicherbetriebs in Kraftwerkstrepfen. Die Wasserwirtschaft 42 (1952) S. 227-233 und S. 271-275.
17. Ludin, A. Betriebsplan und Ausbautwurf für Wasserkraftwerke mit Tagesspeichern. Zeitschrift für Bauwesen 67(1917) S. 367-408 und 505-556.
18. Ludin, A. Durchlaufspeicherung an Kraftstaffelfläßen. Schweizerische Wasserwirtschaft 16 (1924) S. 76-85.
19. Ludin, A. Fortschritte der Durchlaufspeicherung in der Praxis. Schweiz.Wasser-und Energiewirtschaft 23(1931) S. 85-89.
20. Maier, E. u. Späth, K. Über die Vorgänge in Stauhaltungen bei Anwendung der Tagesspeicherung. Zentralblatt der Bauverwaltung 40 (1920) S. 434-437.
21. Pietsch, W. Der Schwellbetrieb bei Laufwasserkräften. Elektrizitätswirtschaft 51 (1952) S. 611-619.
22. Schmutterer, J. Der Einfluß des Schwellbetriebes der Ennskraftwerke auf die Donau. Österr.Wasserwirtschaft 3(1951) S. 9-12.
23. Vogt, H. Wasserkräfte in der Verbundwirtschaft. München: Riederer 1952
24. Wiener, F. Schleusungs- und Kraftwerkswellen in Schifffahrtskanälen. Studien zu Bau- und Verkehrsproblemen der Wasserstraßen, herausgegeben vom Bundesverkehrsministerium. Offenbach a.M. 1949.