Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 91 (1973)

Heft: 40

Artikel: Hydraulische und geschiebetechnische Besonderheiten und ihre Berücksichtigung bei der Wasserkraftnutzung in den Peruanischen Anden

Autor: Huber, Andreas / Schmid, Hermann

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72012

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 09.08.2025

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

91. Jahrgang Heft 40 SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG 4. Oktober 1973

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 690

Hydraulische und geschiebetechnische Besonderheiten und ihre Berücksichtigung bei der Wasserkraftnutzung in den Peruanischen Anden

Von **A. Huber** und **H. Schmid**, Baden

DK 627.84/88

Die Nutzung des reichen Dargebotes an Wasserkräften in den Anden stellt an den Betrieb der Anlagen besondere Anforderungen. Eine wirtschaftliche Betriebsweise kann erst nach einer gründlichen Abscheidung von Geschiebe und Schwebstoffen aus dem Triebwasser erreicht werden.

Die für die Kraftwerke Pativilca und Matucana erstellten Fassungen arbeiten nach dem Prinzip der Geschiebeumlenkung. Solche Fassungen sind zur Wasserentnahme aus geschiebeführenden Gebirgsflüssen am besten geeignet und zeichnen sich gegenüber anderen Fassungstypen durch mehrfach geringere Spülwasserverluste und durch weniger häufige Spülungen aus. Wegleitend für ihre Bemessung waren die Ergebnisse des Modellversuches, einem unentbehrlichen, zuverlässigen und anschaulichen Hilfsmittel.

An die Lösung der Aufgabe war die Bedingung eines möglichst uneingeschränkten und durchgehenden Betriebes der Turbinen gestellt. Die Wirksamkeit der Entsander war derart zu wählen, dass einerseits die mutmasslichen Zeitabstände der Maschinenrevisionen im Interesse eines wirtschaftlichen Betriebes nicht zu kurz ausfallen und andererseits sich der bauliche Aufwand für die Entsanderbauwerke in vertretbaren Grenzen bewegt. Die Bemessung der Entsanderbecken erfolgte nach den Erkenntnissen über den Absetzvorgang in der turbulenten Strömung.

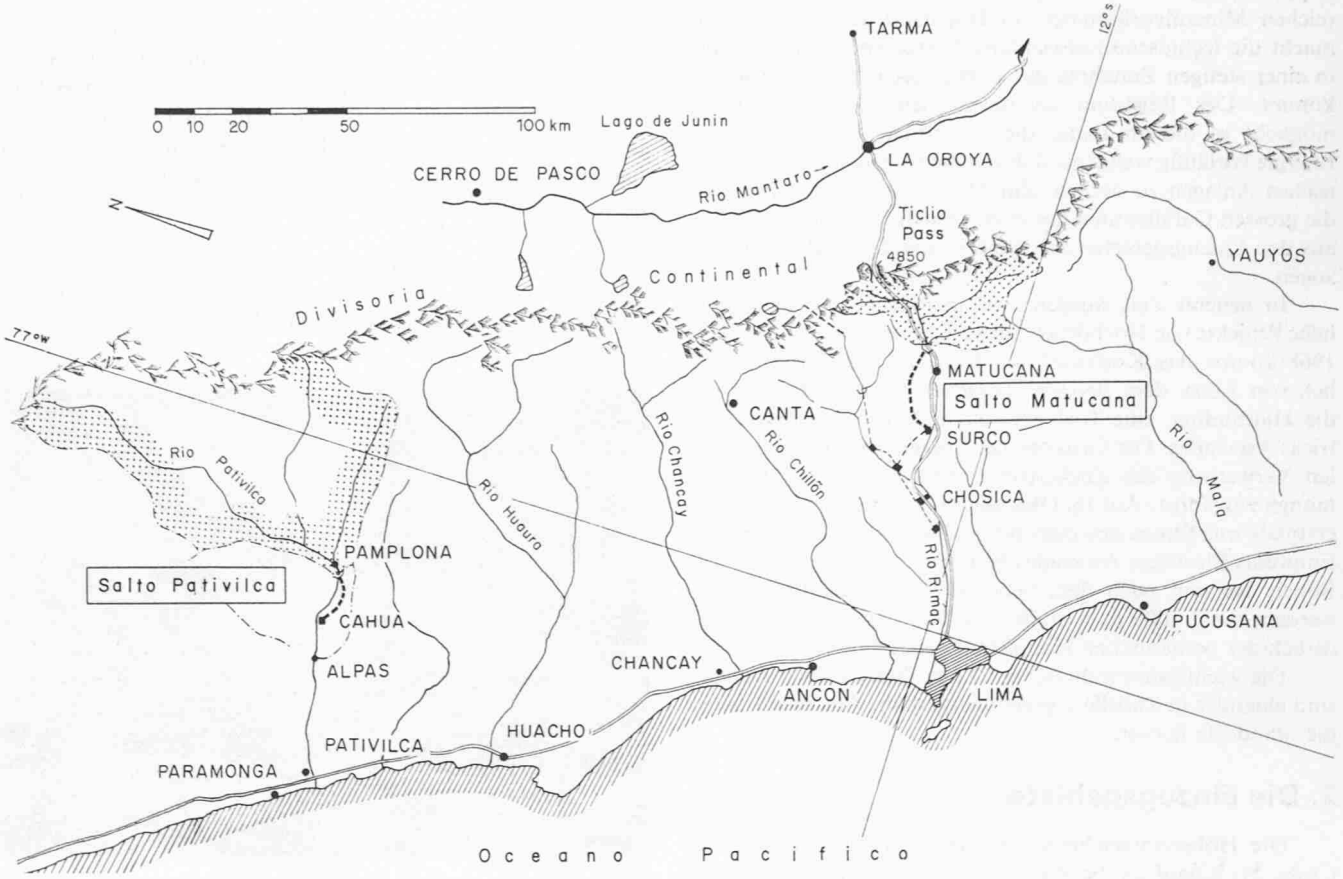


Bild 1. Übersichtskarte des Küstengebietes von Zentralperu mit der Wasserscheide der Andenkette, mit der Lage des Rio Rimac, des Rio Pativilca und den daranliegenden Kraftwerkstufen. Massstab 1:2000000

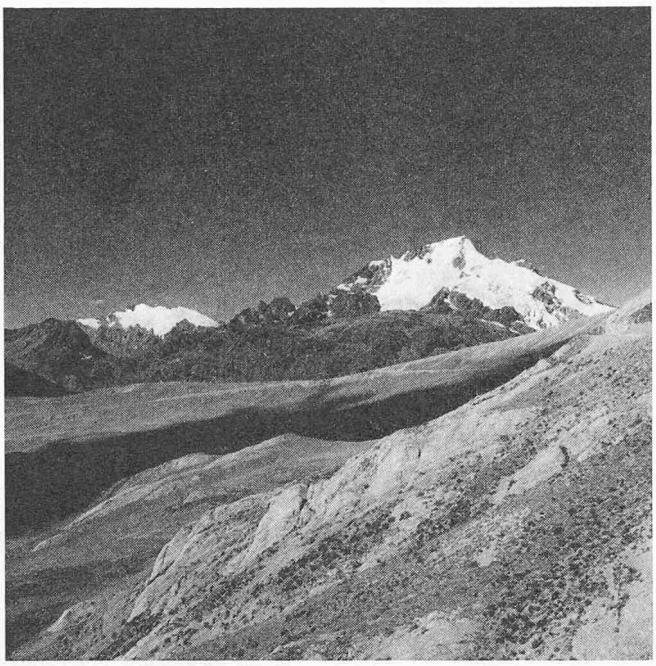


Bild 2. Die höchsten Gipfel der Westkordilleren reichen in der Gegend des Ticlio Passes bis auf 5900 m ü. M. und bilden die Wasserscheide zwischen Atlantik und Pazifik

1. Einleitung

Infolge der fortschreitenden Industrialisierung und Elektrifizierung steigt in Peru die Nachfrage nach Energie um beträchtliche Zuwachsraten. In der Grossstadt Lima und ihren Agglomerationen nimmt der Verbrauch jedes Jahr um etwa 10% zu. Aber auch im übrigen Küstengebiet und dort, wo die reichen Mineralvorkommen im Hochland abgebaut werden, macht die technische Entwicklung Fortschritte, was ebenfalls in einer stetigen Zunahme des Energiebedarfs zum Ausdruck kommt. Der Reichtum an natürlichen Wasserkräften ermöglicht es diesem Land, die Nachfrage nach elektrischer Energie vorläufig weitgehend durch die Erzeugung aus hydraulischen Anlagen zu decken. Zur Nutzung werden vorwiegend die grossen Gefällsstufen der in den Pazifik mündenden Flüsse aus den Einzugsgebieten am Westabhang der Anden herangezogen.

In neuerer Zeit wurden zwei in mancher Hinsicht ähnliche Projekte von Hochdrucklaufwerken verwirklicht. Im Jahre 1968 konnte das Kraftwerk am Rio Pativilca, 200 km nördlich von Lima, dem Betrieb übergeben werden. Bauherr war die Hidrandina, eine Tochtergesellschaft der Empresas Electricas Asociadas. Der Grossteil der Energie wird der industriellen Verwertung des Zuckerrohres nahe der Ortschaft Paramonga zugeführt. Am 16. Oktober 1971 wurde die Stadt Lima erstmals mit Strom aus dem neuen Kraftwerk Matucana der Empresas Electricas Asociadas beliefert. In der Zentrale Pablo Boner, benannt nach dem Schöpfer der ersten Projektidee, werden rund 1000 m Gefälle des Rio Rimac etwa 70 km östlich der peruanischen Hauptstadt genutzt (Bild 3).

Die wichtigsten technischen Daten dieser beiden Anlagen sind einander in Tabelle 1 gegenübergestellt. Aus Bild 1 gehen die Standorte hervor.

2. Die Einzugsgebiete

Die Höhenunterschiede von der pazifischen Küste, der Costa, bis hinauf an die Westkordilleren sind beträchtlich. In einer Entfernung von nur 100 km zur Meeresküste erhebt sich eine Gebirgskette, deren Gipfel die 5000-m-Grenze weit überragen. Steile, tief eingeschnittene Täler durchqueren das vegetationsarme Zwischengebiet. Durch Verwitterung und Erosion geprägte Gebirge verschiedener Entstehungsgeschichte trennen diese Täler voneinander. Die in der Niederschlagsperiode zu wilden Gebirgsflüssen anwachsenden Gewässer führen dem Pazifik gewaltige Geschiebemassen zu.

Aus der tropischen Feuchtigkeit des Amazonasbeckens gebildete Wolkenfelder gelangen während den Regenmonaten, durch Passatwinde getrieben, in den Bereich des Andengebirges, wo sie ihre Wasserfracht in der Form von Steigregen abgeben. Noch bedeutende Niederschläge entfallen auf das Hochland, das zwischen den West- und Ostkordilleren eingebettet liegt. Nur ein geringer Teil der Feuchtigkeit vermag in die Einzugsgebiete jenseits der die Wasserscheide zwischen Atlantik und Pazifik bildenden Westkordilleren einzudringen. Während am Gebirgskamm in 5000 m Höhe Jahresniederschläge von 900 mm zu erwarten sind, kann in 2000 m Höhe nur noch mit 350 mm gerechnet werden. An der peruanischen Küste, wo Regenfälle zur Seltenheit gehören, herrscht, beeinflusst vom kühlen Humboldtstrom, ein gemässigtes und trockenes Klima.

Die Vergletscherung der Einzugsgebiete beträgt nur wenige Prozente und konzentriert sich auf die grösseren Erhebungen von über 5000 m (Bild 2).

Die geringen Niederschläge, welche sich überdies nur auf die Regenmonate Dezember bis März beschränken, reichen als Lebensgrundlage für eine grüne und ausgedehnte Vegetationsdecke nicht aus. Die Gebirge sind der mechanischen Verwitterung deshalb besonders ausgesetzt. Die Verwitterung wird in tektonisch gestörten Zonen und durch die häufigen Erdbeben begünstigt. Der starke Abfall des Gebirges nach Westen und die auftretenden Starkregen tragen das ihre zur Bildung von Erosionsschluchten bei. Der mittlere jährliche Abflusskoeffizient beträgt in diesen kahlen und steilen Gebieten bis zu 75% (Bild 4).

Eine typische Erscheinung des Zusammenspiels aller dieser Merkmale ist das in der Regenzeit häufige Auftreten vieler Murgänge aus wassergesättigten Verwitterungsmaterialien. Die Schuttkegel dieser mit Geröll vermischten Schlammassen, im peruanischen Volksmund Huayco genannt, dringen von den Seitenhängen bis in das Bett der Hauptflüsse vor, verwüsten den oft kultivierten Talgrund und unterbrechen die wenigen Verkehrsadern.

Das Regime der Flüsse ist sehr unausgeglichen und unterliegt dem Einfluss dieser Naturgeschehen und den sich im Jahreszyklus ändernden Wetterverhältnissen. Wasserführung,

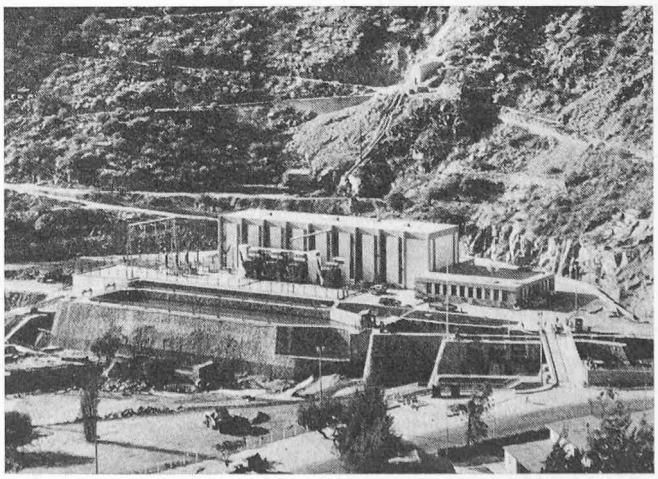


Bild 3. Zentrale Pablo Boner in Surco mit einer installierten Leistung von 120 MW. Davor die Fassung und die Entsanderanlage der älteren Ausbaustufe Callahuanca. Im Vordergrund die transandinische Strasse

Geschiebetrieb, Schwebstoffgehalt, Geschwemmseltransport und Chemismus sind dauernden und nicht selten plötzlichen starken Veränderungen unterworfen. Die quantitative Kenntnis dieser Eigenheiten war eine wesentliche und notwendige Grundlage für die Abfassung der Projekte. Anfänglich standen der Projektierung des Kraftwerkes Pativilca nur spärliche Angaben zur Verfügung, die im Laufe der Bauzeit ergänzt werden konnten. Hingegen lagen über das erschlossene Rimactal schon zu Projektbeginn zahlreiche Messwerte vor.

3. Allgemeines zu den Projektierungsgrundlagen der Wasserfassungen

3.1. Die Umlenkfassung

Die Entnahme von Triebwasser aus einem Gebirgsfluss dieser Art stellt besondere Anforderungen an das Fassungsbauwerk. Zur Aufrechterhaltung eines störungsfreien Kraftwerkbetriebes sind bei jeder Zuflusswassermenge Geschiebe, Schwebstoffe und Geschwemmsel vom Triebwasser abzuscheiden. Die Bedienung und Wartung der Fassung und ihrer Regulier- und Spülorgane soll einfach sein und wenig Personal erfordern. Die sogenannte Umlenkfassung mit anschliessender Entsanderbatterie ist am besten dazu geeignet, diese Bedingungen zu erfüllen. Vorteilhaft ist weiter die gute Ausnützung des Wasserdargebotes infolge geringer Spülverluste. Bei Geschiebetrieb kann erfahrungsgemäss noch bis zur Hälfte der Zuflusswassermenge geschiebefrei gefasst werden [1]. Die Arbeitsweise sei im folgenden kurz beschrieben:

Der zu fassende Fluss wird durch eine entsprechende Anordnung des Fassungseinlaufes, des Wehres, der Buhnen und der Leitwerke zum Durchfliessen eines gekrümmten Gerinnes gezwungen (Bild 8). Das Wasser wird an der Krümmungsaussenseite entnommen. Verursacht durch die künstlich erzeugte Drehströmung drängen sich die an der Oberfläche mit grösserer Längsgeschwindigkeit bewegenden Flüssigkeitsteilchen stärker nach der Krümmungsaussenseite als die sohlennahen und durch die Gerinnerauhigkeit gebremsten Teilchen (gemäss dem Gesetz über die Radialbeschleunigung $b_r = v^2/r$, mit v als tangentielle Strömungsgeschwindigkeit und r als Krümmungsradius). Die radialen Druckunterschiede werden durch eine Querströmung (Sekundärströmung) ausgeglichen. An der Wasseroberfläche ist die Querströmung nach der Aussenseite der Krümmung gerichtet, währenddem die sohlennahen Wasserschichten aus Kontinuitätsgründen der Innenseite zuströmen und gleichzeitig Geschiebe in der selben Richtung mitbewegen. Die Geschiebeumlenkung kann übrigens an

Bild 4. Gebirgsformationen im Bereich des Rimactales oberhalb von Matucana. In den Höhenlagen über 3000 m ü. M., wo die Niederschläge reichlicher fallen, wird das Land in Terrassen bebaut

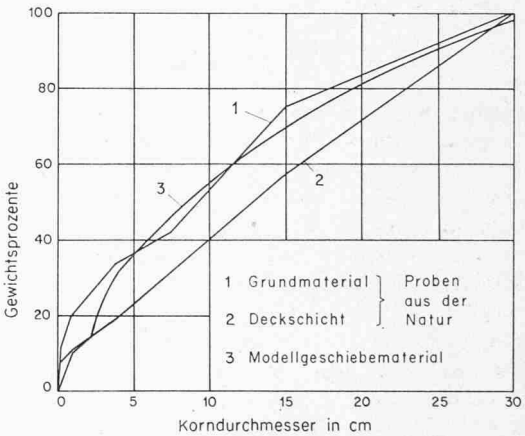


Bild 5. Geschiebekornverteilung für den Rio Pativilca bei der Fassung

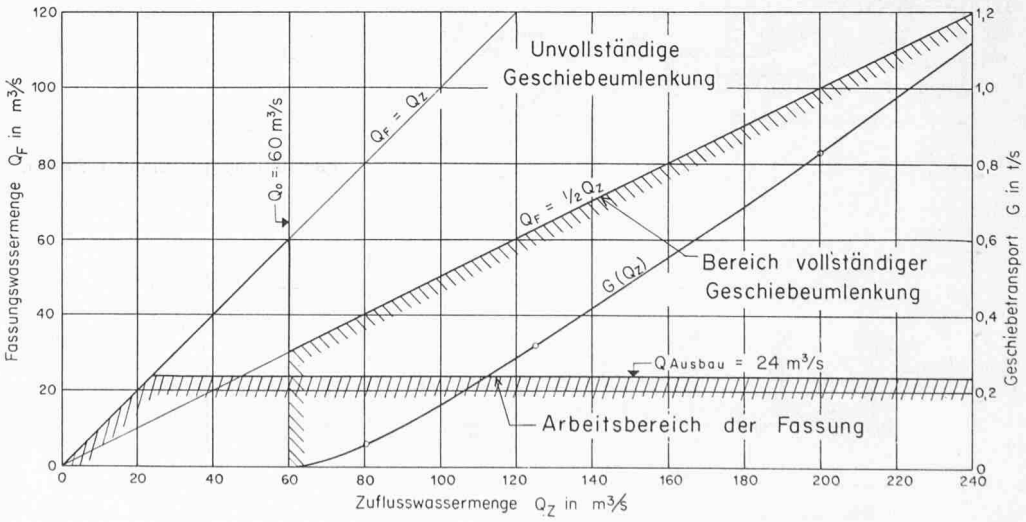


Bild 6. Geschiebefunktion des Rio Pativilca, Arbeitsbereich der Fassung

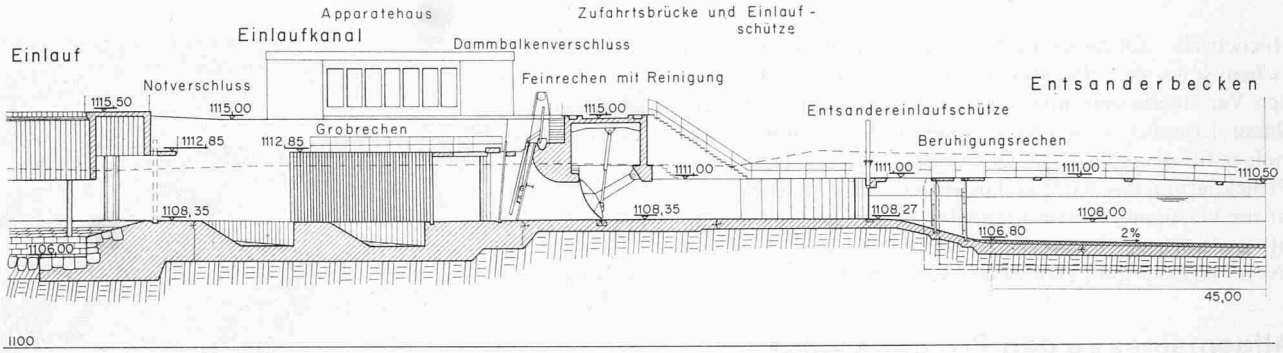


Bild 7. Längsschnitt durch Einlaufbauwerk und Entsander der Wasserfassung am Rio Pativilca. Massstab 1:500

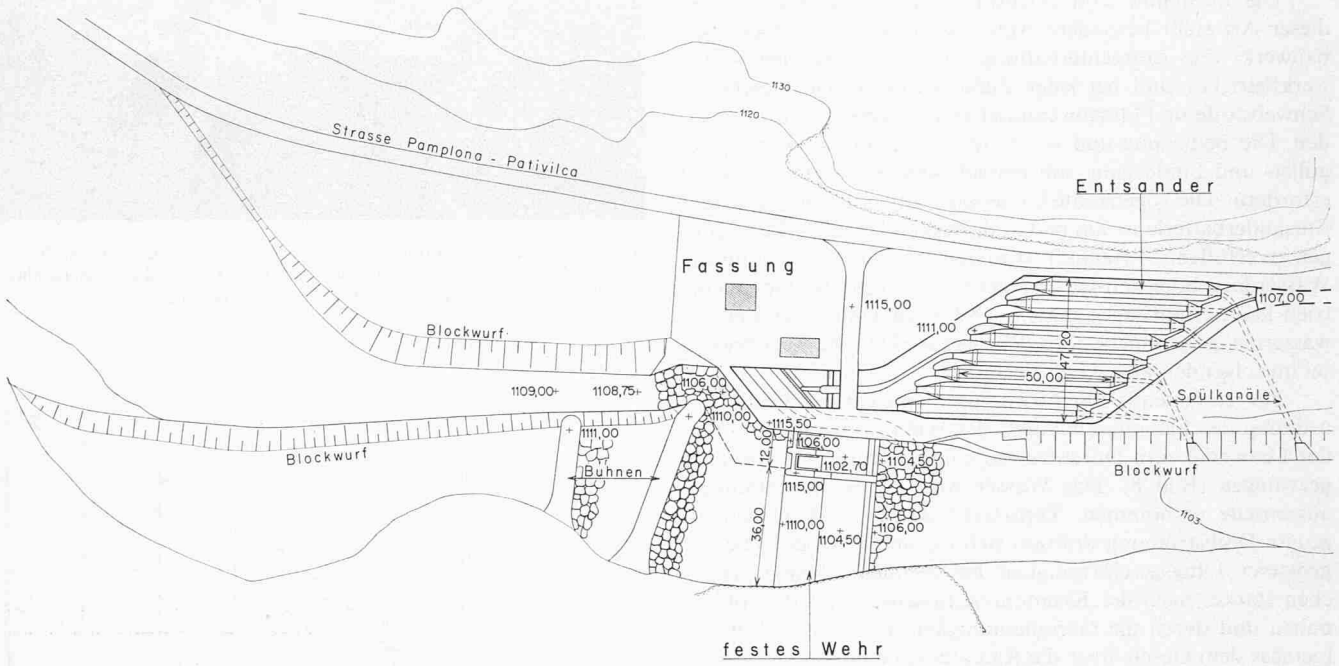


Bild 8 (oben). Übersichtsplan 1:2000 der Wasserfassung am Rio Pativilca

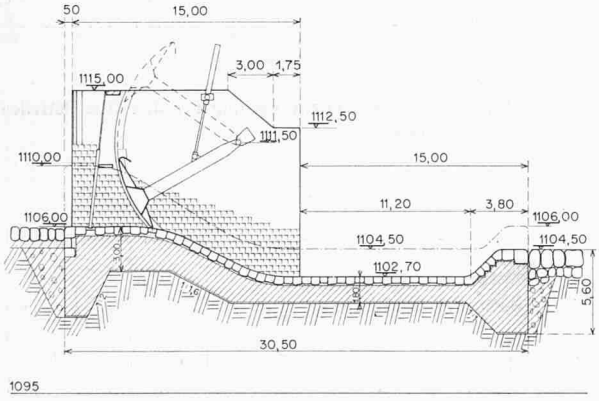
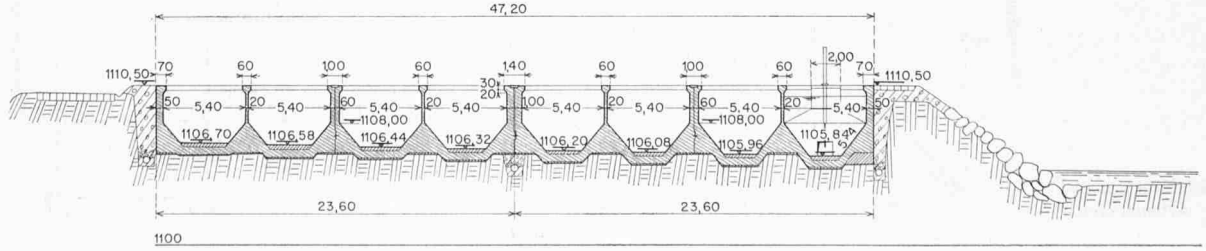
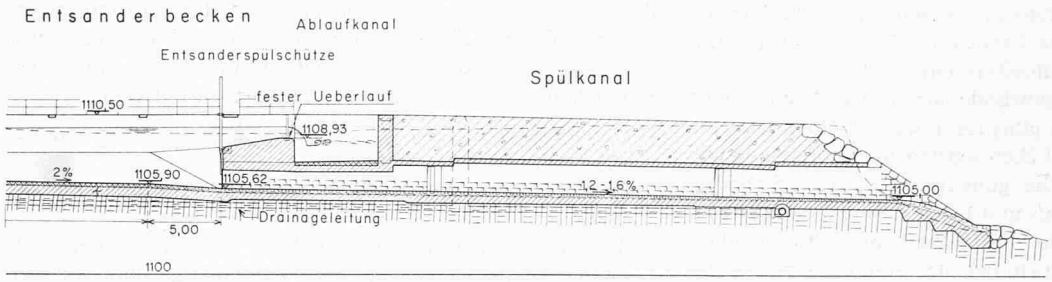
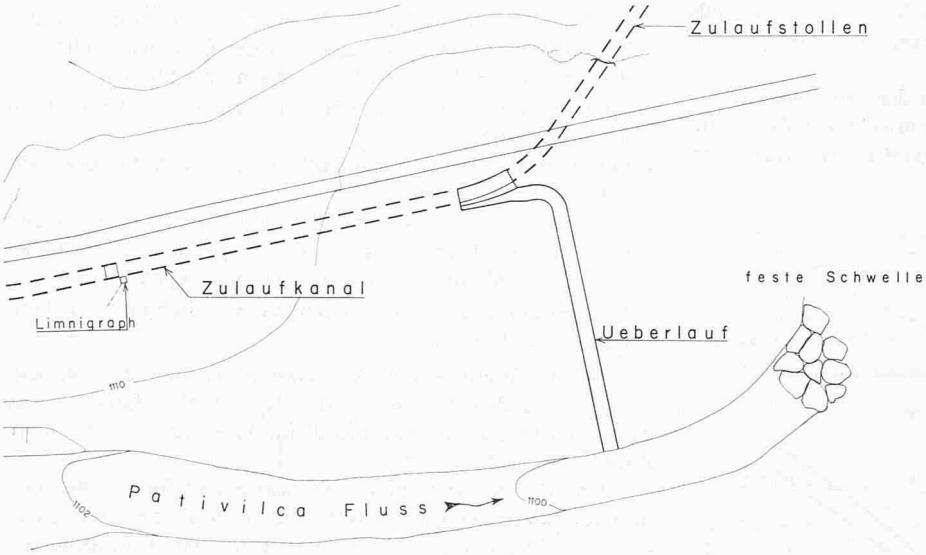


Bild 9 (links). Schnitt 1:500 durch das Wehr

Bild 10 (unten). Schnitt 1:500 durch den Entsander







jedem Flussmäander beobachtet werden: die Kiesbänke bilden sich an den Kurveninnenseiten.

3.2. Der Modellversuch als Hilfsmittel bei der Projektierung

Die zuverlässige Bemessung des Fassungsbauwerkes gelingt nur mit Hilfe gründlicher Modellversuche. Diese Massarbeit setzt umfassende topographische, grundbauliche, hydrologische und geschiebetechnische Grundlagen voraus. Zu den letzteren gehört die sogenannte Geschiebefunktion, die Beziehung zwischen dem Abfluss und dem zugehörigen Geschiebetransportvermögen. Sie ist in der Regel nicht von vornherein bekannt und muss daher in besonderen, nachstehend beschriebenen Vorversuchen bestimmt werden.

Für die üblichen Modellmassstäbe unterstehen die hydraulischen und die geschiebetechnischen Modellvorgänge dem Froudschen Ähnlichkeitsgesetz, welches auf gleichen Verhältnissen von Trägheitskraft zu Schwerkraft in Natur und Modell beruht. Die Versuche dürfen demnach quantitativ gewertet werden [2]. Nicht naturgetreu verhalten sich im Froudschen Modell die Schwebstoffe, deren Bewegungen vorwiegend vom Verhältnis ihrer Trägheitskraft zur Zähigkeit der Flüssigkeit abhängen und vom Reynoldschen Ähnlichkeitsgesetz beschrieben werden. Bei der Durchführung der Versuche können die Schwebstoffe ausser Acht gelassen werden.

Das natürliche Flussbett wird auf eine Länge von einigen 100 m im Bereich der zukünftigen Fassung unter Verwendung der entsprechenden Geschiebemischung massstabsgetreu nachgebildet. In Bild 5 ist eine solche Kornverteilung am Beispiel des Rio Pativilca dargestellt. Zu verschiedenen Abflüssen werden die weder zu Auflandungen noch zu Erosionen führenden Geschiebebeschickungen gesucht. Die in einer bestimmten Zeitspanne dem Modellzufluss beigegebene Geschiebemenge muss also gleich der im Modellkiesfang abgelagerten sein. Der Zustand des Sohlengleichgewichtes wird schrittweise unter Änderung der Beschickungsmenge durch eine Reihe von Versuchen angenähert. Wegen ihres iterativen Charakters werden diese als Karussellversuche bezeichnet. Ein wesentliches und anhand der Naturbeobachtungen überprüfbares Versuchsergebnis sind der Grenzabfluss Q_0, bei welchem die Grenzsohlenschubspannung erreicht ist und bei welcher der Geschiebetrieb einsetzt, sowie das sich einstellende Gleichgewichtsgefälle der Sohle. Als Beispiel ist in Bild 6 die Geschiebefunktion $G(Q_s)$ des Rio Pativilca eingezeichnet.

Für den Projektentwurf lohnt es sich, einige Erfahrungsregeln zu beachten, um den Zeitbedarf für die Versuchsdurchführung kleiner zu halten. Das Kernproblem bei der Durchführung der Versuche an der Umlenkfassung liegt in der Erzeugung einer wirksamen Drehströmung. Die günstigste Anordnung liegt vor, wenn der Kopf einer Buhne, im Mittelpunkt der künstlichen Krümmung liegend, mit beiden Flanken des Einlaufes ungefähr ein gleichseitiges Dreieck bildet (Bild 8). Um die Geschiebeumlenkung nicht zu beeinträchtigen, soll die Strömungsgeschwindigkeit im Fassungseinlauf unter 1,2 m/s liegen. Bei gegebener Ausbauwassermenge ist somit die Fläche des Einlaufquerschnittes festgelegt. Die Einlaufbreite darf nur so gross gewählt werden, dass sie noch gänzlich in den Bereich der Drehströmung zu liegen kommt. Die sich ergebende Einlauftiefe an der Schwelle entscheidet zusammen mit der am beweglichen Wehr einzuregulierenden Normalstaukote über die Höhenlage der Einlaufschwelle. Die Normalstaukote ist zugleich die zur Entnahme der Ausbauwassermenge erforderliche Minimalkote. Sie richtet sich nach der Topographie in der Umgebung der Fassung und ist mitbestimmend für das hydraulische Längenprofil der gesamten Kraftwerkanlage. Im Fall

eines Hochwassers erübrigt sich ein Einstau durch die Schützen weil die Normalstaukote ohnehin überschritten wird. Die Bemessung der Regulierorgane kann unter Anwendung der üblichen Überfall- und Durchflussformeln erfolgen.

Die Umrisse der Seitenwände am Einlaufkanal sollen möglichst eine hydraulisch günstige Form erhalten. Herausspringende und umströmte Ecken werden zur Vermeidung von Ablösungen abgerundet. Die günstigsten Fliessgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,5 m/s und 1,2 m/s. Sind die Geschwindigkeiten kleiner, so besteht die Gefahr von Schwebstoffablagerungen. Grössere Geschwindigkeiten sind die Ursache unerwünschter Turbulenz. Die entstehenden Wirbel könnten durch die Einlaufkanäle in die Entsanderbecken vordringen und dort den Absetzvorgang stören.

Zur raschen Spülung bindiger Materialien und allfällig eingedrungener, grosser Steine wird der Sohle des Spülkanals oder der Spülgasse des Fassungseinlaufes ein Gefälle von mindestens 2,5% gegeben.

Die Versuche am Modell des nach den vorangehend beschriebenen Richtlinien abgefassten Entwurfes haben zum Ziel, Formgebung und Bemessung zu verbessern. Weiter ergeben sich aus dem Versuch einige wichtige Abmessungen, deren Ermittlung wegen der komplizierten Strömungsvorgänge allein dem Experiment vorbehalten sind. Das Versuchsprogramm umfasst etwa die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Fassungsanlage in folgenden Punkten:

- Geschiebeumlenkung auf der Grundlage der vorgängig bestimmten Geschiebefunktion.
- Durchlassvermögen der Wehranlage und Bestimmung des Wehrreglementes.
- Strömungsverhältnisse vor und im Einlauf, in den Entsanderverteilkanälen, um den Trennpfeiler und vor den Wehrschützen.
- Tosbeckenabmessungen unter Einhaltung der Bedingung, dass der entstehende Wassersprung für sämtliche zu erwartenden Abflüsse oberhalb der Endschwelle bleibt.
- Kolkschutzmaterial und Kolktiefen im Anschluss an das Tosbecken und den Spülkanal, vor der Einlaufschwelle und den Pfeilern, entlang den Ufermauern und Buhnen.
- Spülvorgang im Bereich vor der Einlaufschwelle und im Fassungseinlauf.
- Stabilität des Oberwasserspiegels bzw. seine Anfälligkeit auf Schaukelbewegungen.
- Längenprofil des Flusses im Ober- und Unterwasser vor und nach dem baulichen Eingriff und Möglichkeiten zur Sicherung der Sohle und der Uferböschungen gegen Erosionen.
- Bauzustand und die zu treffenden Massnahmen zur Umleitung des Flusses.

Nach diesem Versuchsprogramm wurden die Modellversuche an den Fassungen der Kraftwerke Pativilca und Matucana in der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse sind wegleitend für die Bearbeitung des Bauprojektes. Der Aufwand der Versuche ist in jedem Fall gerechtfertigt und schliesst eine falsche Bemessung des Bauwerkes weitgehend aus. Für die Kosten der Modellversuche sind je nach der Grösse des Objektes einschliesslich Wehr und Entsander und des Versuchsprogrammes etwa 1,0 bis 2,0% der Bausumme einzusetzen.

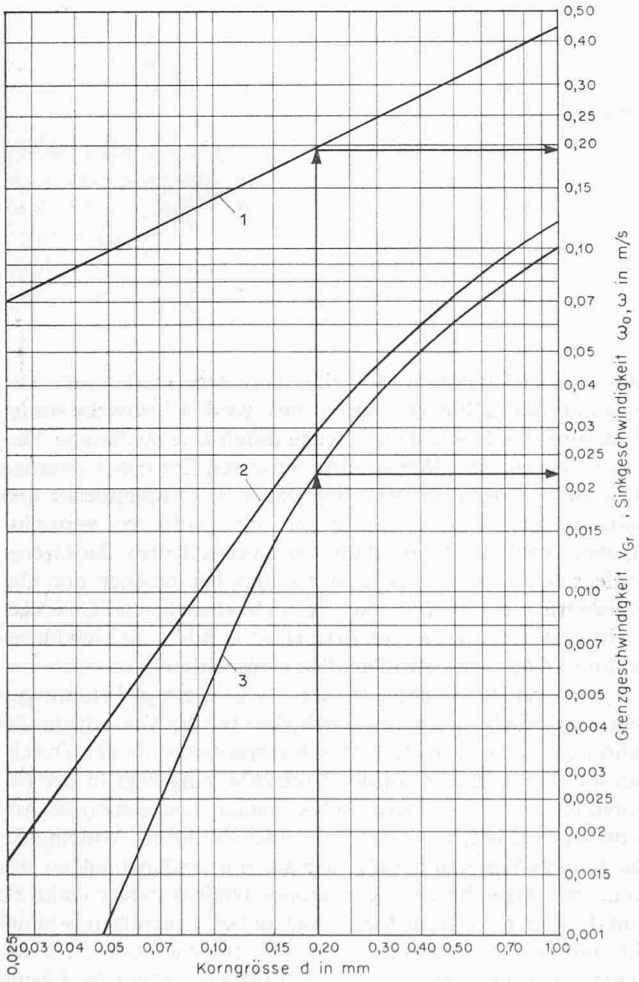


Bild 11. Diagramm zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit im Entsanderbecken

1 Grenzgeschwindigkeit v_{Gr} (d) = 0,44 $\sqrt{d}$ (d in mm, v_{Gr} in m/s)

2 Sinkgeschwindigkeit von Sand in ruhendem Wasser (γ_s = 2,65 t/m³) bei 10 °C ω_0 (d)

3 Sinkgeschwindigkeit von Sand in fliessendem Wasser (γ_s = 2,65 t/m³) bei 10 °C ω (d, v_{Gr})

Ablesebeispiel: Es sind die Schwebstoffe bis d = 0,2 mm auszuscheiden. Aus dem Diagramm ergibt sich: v_{Gr} = 0,195 m/s (maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit im Becken), γ = 0,022 m/s (Sinkgeschwindigkeit in fliessendem Wasser)

3.3. Die Bemessung der Entsanderanlagen

Die Wirkungsweise der Entsanderanlage lässt sich nicht im gleichen Modellmassstab wie die Fassung untersuchen, wäre doch infolge der geringen Turbulenz beim Absetzvorgang die Froudsche Ähnlichkeit nicht mehr erfüllt. In der Regel kann auf die Versuche überhaupt verzichtet werden. Die Erfahrung und die Grundlagenforschung geben Richtlinien, deren Beachtung zur richtigen Bemessung der Entsanderbecken führt.

Messungen, die an schweizerischen und italienischen Anlagen durchgeführt worden sind, geben Anhaltspunkte über die Grössenordnung der im Triebwasser vorhandenen Schwebstoffkonzentrationen und über erreichbare Entsandungsgrade [3]. Ein Bild von zu erwartenden Maschinenschäden und Wirkungsgradeinbussen vermittelt der Bericht über diesbezügliche Betriebserfahrungen am Kraftwerk Grande-Dixence [4].

Für eine feine Entsandung, wie sie bei Hochdruckanlagen angestrebt wird, kommt der Turbulenz der Beckenströmung vermehrte Bedeutung zu. Die Sinkbewegung wird erst eingeleitet, wenn der turbulenzbedingte dynamische Auftrieb nicht mehr ausreicht, das Korn in der Schwebe zu halten. Sandkörner einer gewünschten kleinsten Grösse gelangen zur Absetzung, wenn die Fliessgeschwindigkeit, ein Mass für die Turbulenz, einen mit abnehmender Grösse des Kornes kleiner werdenden Grenzwert v_{Gr} nicht überschreitet. Nach den Betrachtungen über die Grenzsohlenschubspannung von *Camp* [5], der sich auf die Versuchsergebnisse von *Shields* stützt [6], erhält man für Sandkörner im Bereich 1,0 mm $\geq d \geq$ 0,1 mm

folgende Beziehung zwischen der Grenzgeschwindigkeit v_{Gr} (in m/s) und der Grösse des kleinsten abgesetzten Kornes d (in mm), siehe auch Bild 5:

$$v_{Gr} = 0{,}44 \cdot \sqrt{d}$$

Die Turbulenz wirkt sich überdies bremsend auf die Sinkbewegung der Körner aus. Die Verminderung der Sinkgeschwindigkeit $\triangle\omega$ – sie ist abhängig von der Schwebstoffkonzentration, den Beckenabmessungen und der Durchflussgeschwindigkeit, die der Grenzgeschwindigkeit gleichgesetzt wird – ergibt sich für die praktisch vorkommenden Fälle nach Camp zu 0,04 v_{Gr}. Die effektive Sinkgeschwindigkeit in fliessendem Wasser wird somit

$$\omega = \omega_0 - \triangle\omega = \omega_0 - 0{,}04\, v_{Gr}$$

wenn für ω_0 die bekannten Werte der Sinkgeschwindigkeit in ruhendem Wasser eingesetzt werden (Bild 11).

In der Regel ist die grösste Tiefe t_{max} der Entsanderbecken aus topographischen oder wirtschaftlichen Gründen gegeben. Die wirksame Beckenlänge in m beträgt $L_w = t_{max} \cdot v_{Gr}/\omega$ und entspricht der Horizontaldistanz der Absinkkurve. Die Durchflussfläche F ergibt sich bei gegebener Ausbauwassermenge Q_a zu

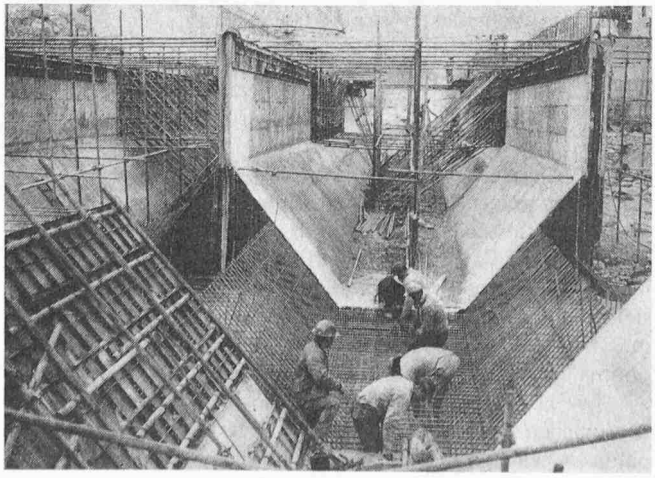
$$F = Q_a/v_{Gr}$$

Ein ungestörter Absetzvorgang erheischt bei der Projektierung das Einhalten einiger weiterer konstruktiver Regeln. Zur Vermeidung von Randwirbeln und einer zu starken Mittelströmung sollte die Breite B eines einzelnen Beckens nicht mehr als etwa $^1/_8$ der Länge betragen. Grössere Ausbauwassermengen führen deshalb meistens zur Aufteilung des Durchflussquerschnittes in mehrere parallele Becken. In der gesamten Beckenlänge

$$L_{Tot} = L_w + 2\,B$$

wird der Turbulenzbereich der störenden Zuströmung und des Ausflusses durch einen Zuschlag entsprechend der doppelten Beckenbreite berücksichtigt. Um Krümmungswirbel vom Becken fernzuhalten, sind die Zulaufkanäle möglichst gestreckt auszubilden. Beim Eintritt in die Becken sind mehrere Rechen zur Beruhigung der noch zu turbulenten Strömung vorzusehen. Die Stäbe der nachfolgenden Rechen werden zunehmend enger versetzt, z.B. in lichten Abständen von 12, 9 und 6 cm. Eine Konstruktion aus Winkeleisen, deren Schenkel der Strömung unter einem Winkel von 45° entgegengehalten werden, hat sich am besten bewährt.

Bild 12. Bau der Entsanderbecken des Kraftwerks Matucana am Rio Pativilca



Ein rasch und gut spülbares Becken soll glatte Wände, eine Sohle von ungefähr einem Drittel der Beckenbreite und wenigstens 1,5% Längsgefälle aufweisen. Die Neigung der seitlichen Borde sollte mindestens 5:4 betragen, um ein Abrutschen der Ablagerungen in die zentrale Spülrinne zu gewährleisten. Der einzurechnende Absetzraum hängt vom voraussichtlich raschesten Spülrhythmus und der Anzahl Becken ab (Bild 12).

4. Die Fassung am Rio Pativilca

4.1. Allgemeines

Die Fassung liegt in der untersten, kurzen Alluvionsebene am Ende des oberen Pativilcatales. Die Talsohle und vielerorts auch die steilen Talhänge sind mit Huaycomaterial überdeckt (Bild 15). Der Fluss hat sich immer wieder den Weg durch das in der Trockenzeit standfeste Material der vordringenden Schuttkegel gesucht. Sein Gerinne liegt meist einige Meter unter dem Talboden und wird von den beinahe senkrechten Uferböschungen eingegrenzt. An der Fassungsstelle überquert der Flusslauf auf Kote 1106 m ü. M. Felsschwellen, die rechtsufrig in eine steile Felswand übergehen. Das Gefälle der natürlichen Flusssohle beträgt 1,5%. Der Normalstau wurde auf Kote 1110.00 m ü.M. gewählt. Im Mitteljahr ist die Ausbauwassermenge von 24 m³/s an 180 Tagen gewährleistet. Das Jahresmittel beträgt 42 m³/s, das gemessene Maximum etwa 600 m³/s.

Die Fassungsanlage gliedert sich in mehrere Teilbauwerke, welchen bestimmte Funktionen zustehen. In einer groben Aufteilung kann unterschieden werden zwischen den Leitwerken im Oberwasser, dem Wehr mit Tosbecken, der eigentlichen Fassung mit Einlaufkanal, der Entsanderanlage, den Nebenbauwerken, bestehend aus Apparate- und Wärterhaus (Bilder 8 und 15), und der flussaufwärts gelegenen Wassermessstation.

4.2. Die Umgestaltung des Flusslaufes und das Wehr

Im Oberwasser übernehmen zwei Buhnen sowie befestigte Wuhren die Zuführung der Strömung auf die erzwungene Gerinnekrümmung vor dem Fassungseinlauf. Der Kopf der unteren Buhne bildet den Mittelpunkt der Krümmung. Kleinere und mittlere Abflüsse konzentrieren sich auf die eng gehaltene Gerinnebreite derart, dass die Schleppkraft immer ausreicht, um die Kontinuität der Geschiebebewegung aufrechtzuerhalten. Bei Wassermengen über 150 m³/s beginnt die Überflutung der Buhnen und des oberhalb liegenden Hochwasservorlandes. Diese Anordnung (Bild 15) beruht auf dem Ergebnis einer Reihe von Modellversuchen. Um auch einem grössten Hochwasser von 1500 m³/s standzuhalten, erwiesen sich für die Befestigung der Wuhren und des Hochwasservorlandes Blöcke mit Gewichten von 2,5 t als notwendig. Der Blockwurf wurde ausserdem mehrschichtig angelegt, um ein Abrutschen einzelner Blöcke zu verhindern.

Die Wehranlage ist aufgeteilt in einen 36 m breiten, festen Überfall und in zwei 5,0 m breite Wehröffnungen zur Aufnahme der beiden Wehrschützen und der Dammbalkenverschlüsse. Die Kronenhöhe des festen Wehres entspricht der Normalstaukote, während die Auflager der beiden Sektorschützen 4,0 m tiefer auf der Höhe der natürlichen Flussohle liegen. Das Wehrreglement wurde durch Versuche bestimmt und sieht folgende drei Arbeitsbereiche vor (Bild 13):

- Die Schützen bleiben geschlossen, der gesamte Zufluss bis zu 24 m³/s wird gefasst.
- Die Schützen werden in Stufen gehoben. Diese Stufen, sie sind aus betriebstechnischen Gründen notwendig, richten sich nach dem Zufluss und nach der Entnahme sowie nach der Bedingung, wonach die Normalstaukote immer erreicht oder höchstens bis zu 60 cm überschritten werden darf. Ein

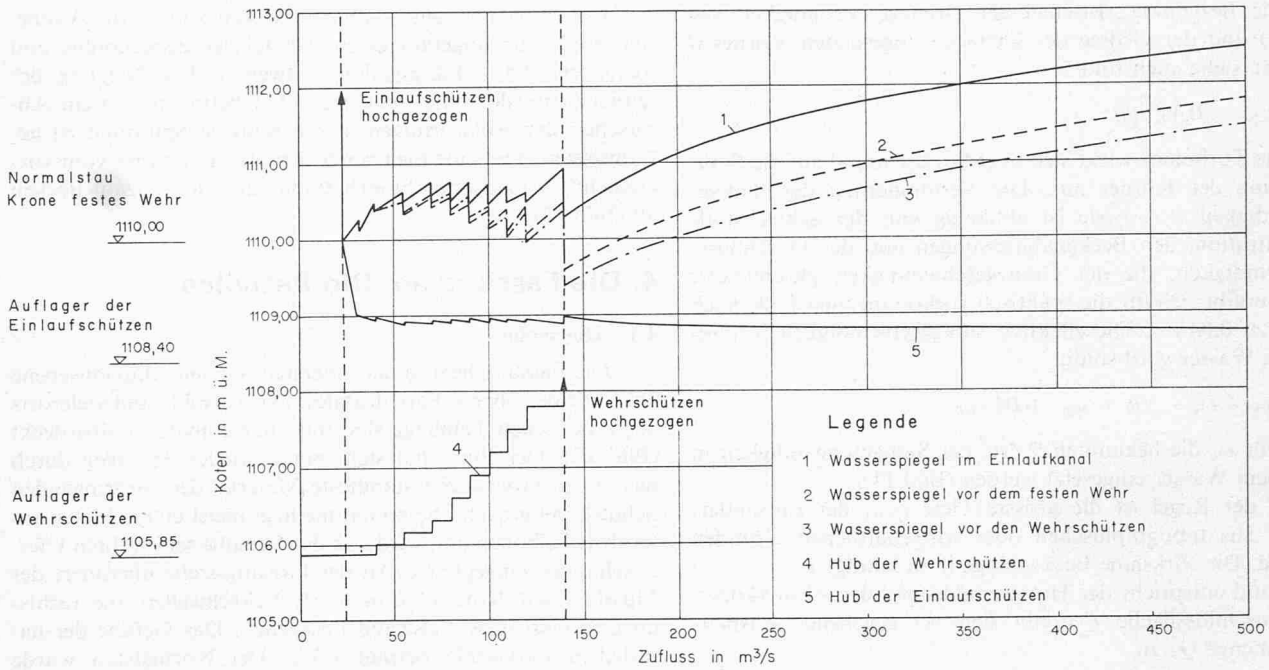


Bild 13 (oben). Wehrreglement für die Fassung am Rio Pativilca, Fassungswassermenge 24 m³/s

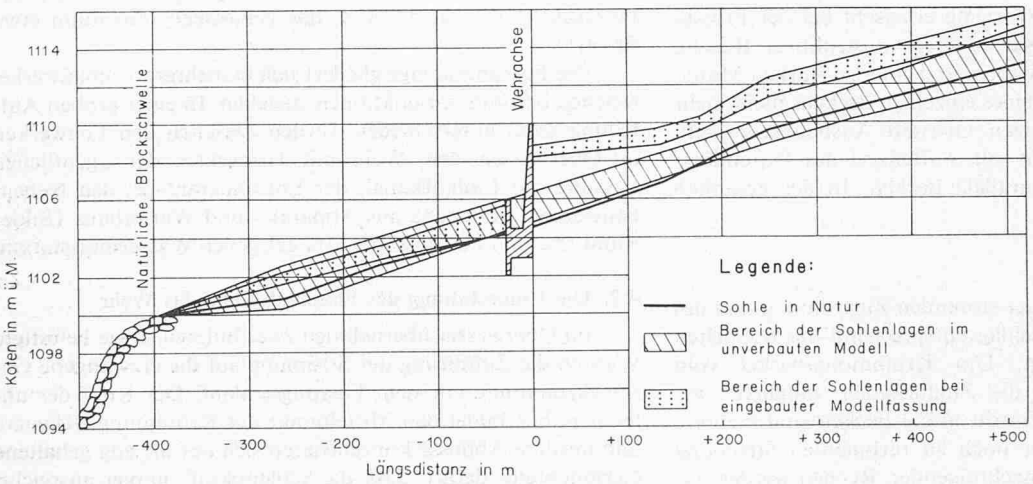
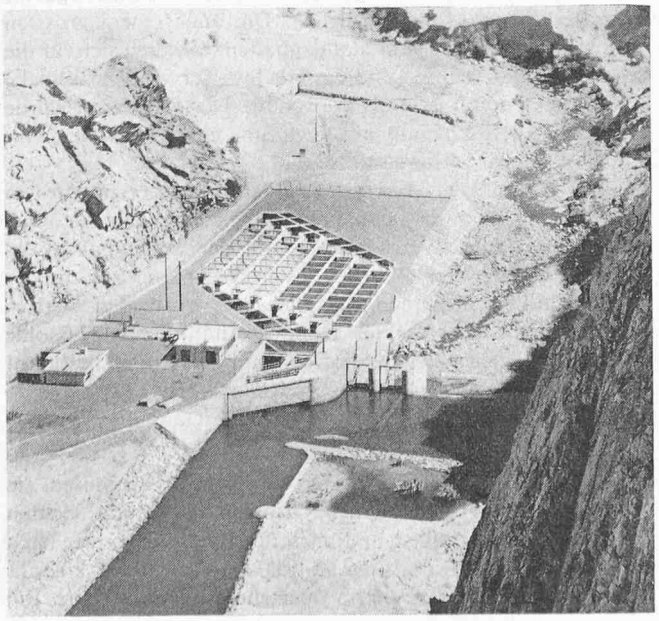


Bild 14 (links). Längenprofil der mittleren Sohlenlagen im Bereich der Fassung am Rio Pativilca

Bild 15. Die Fassung im Pativilcatal. Die grossen Schuttmassen unterhalb der Fassung (im Bildhintergrund) stammen von Huayconiedergängen



Teil des Zuflusses unterströmt die Schützen als Restwasser. Geringere Mengen fallen über den festen Wehrrücken.

– Bei Zuflüssen von 140 m³/s und mehr werden die Schützen vollständig hochgezogen, wobei die zugehörigen Wasserspiegel die Normalstaukote ohne Schützenstau erreichen oder überschreiten. Zur Entlastung der Wehrschützenöffnung und zur Dämpfung des Wasserspiegelanstieges wird der feste Wehrrücken vermehrt belastet.

Im Tosbecken unterhalb des Wehres werden rund 40% der am Überfall frei werdenden kinetischen Energie des Restwassers «vernichtet». Die Turbulenz wird hierdurch auf ein für das Unterwassergerinne erträgliches Mass vermindert. Über die Wirksamkeit der Tosbeckenanlage entscheidet einerseits der Raum, welcher der Energiedissipation zur Verfügung steht, und andererseits die Stützkraft, mit welcher Gegenschwelle und abströmende Wassermassen sich den zuschiessenden Wassermassen entgegensetzen. Unter der Bedingung, dass der entstehende Wassersprung für jede vorkommende Wassermenge innerhalb des Tosbeckens gehalten werden muss, konnte die optimale Bemessung im Versuch gefunden werden.

Die grössere Energiekonzentration im Überfallstrahl des beweglichen Wehres erfordert eine tieferliegende Tosbeckenplatte als beim festen Wehr. Zahnschwellen, welche aus hydrau-

lischer Sicht eine Kürzung des Tosbeckens ermöglicht hätten, konnten wegen der grossen Zerstörungskraft des Geschiebes nicht in Frage kommen. Zum Schutze vor der schmirgelnden Wirkung des suspensionshaltigen und geschiebeführenden Wassers ist das gesamte Bauwerk bis auf die Höhe der Hochwasserlinie mit 40 bis 60 cm starken Granitquadern verkleidet. Die leicht eingetieften Schützenauflager liegen im Strömungsschatten der sie umgebenden Holzkopfpflästerung aus dem besonders widerstandsfähigen Pinienholz.

Die Verminderung der kinetischen Energie im Tosbecken reicht nicht aus, die Abflussverhältnisse dem natürlichen Unterwassergerinne anzupassen. Dieses muss deshalb über eine kürzere Strecke künstlich gepflästert und vor der erhöhten Turbulenz des Abflusses geschützt werden. Die Befestigung, ein 30 m langer und 2 m mächtiger Teppich mit Blöcken bis zu 6 t Gewicht an der Oberfläche, schützt die Tosbeckengründungen und die Uferböschungen vor Unterspülungen (Bild 17). 400 m wird das Flussbett, dessen Stabilität für den Bestand des Blockteppichs massgebend ist, durch eine natürliche Schwelle aus grossen Felsblöcken fixiert. Die von der Wasser- und Geschiebeführung abhängigen Lagen der Flussohle enden im Längenprofil alle an dieser als Fixpunkt wirkenden Stelle und bilden innerhalb eines Bereiches ein Strahlenbündel. Tiefe und für das obenliegende Bauwerk ungünstige Sohlenlagen stellen sich bei grossen Abflüssen und geringer Geschiebeführung ein, z.B. während des Ansteigens einer Hochwasserwelle. In Bild 14 sind die Schwelle und als Versuchsergebnisse die möglichen Sohlenlagen eingezeichnet. Weiter ist in diesem Bild die gute Übereinstimmung von Natur- und Modellsohle sowie die Hebung der Oberwassersohle nach der Erstellung des Wehres erkennbar.

4.3. Das Fassungsbauwerk und der Einlaufkanal

Die genauen Höhenlagen und die günstigsten Abmessungen der eigentlichen Fassung ergaben sich aus den Modellversuchen. Diesen Versuchen liegt die Kornverteilung des Geschiebematerials (Bild 5) und die vorgängig bestimmte Geschiebefunktion (Bild 6) zugrunde. Angestrebt wurde eine Fassungsanordnung mit einem Arbeitsbereich, wie er aus Bild 6 hervorgeht. Die Ausbauwassermenge von 24 m³/s ist kleiner als die Hälfte der geschiebeführenden Zuflüsse, welche 60 m³/s und mehr betragen. Wenige, jedoch wirksame Verbesserungen am Modellbauwerk führten zur gewünschten Geschiebeumlenkung.

Uferseitig des Einlaufes verengt ein nasenförmiger Vorsprung den Einlaufquerschnitt. Erst mit dem Anbringen dieses unscheinbaren Bauwerkteiles gelang es, das Geschiebe gänzlich vom Fassungseinlauf fernzuhalten. Diese Nase versetzt die Zuströmung rechtzeitig in die Drehbewegung. Der 16 m breite Fassungseinlauf liegt in einem Winkel von 45° zur Anströmungsrichtung und bildet die Aussenseite der künstlichen Krümmung (Bild 8). Bei Normalstau beträgt die Einlaufgeschwindigkeit der Ausbauwassermenge 0,9 m/s. Zwischen Einlaufkanal und beweglichem Wehr steht der Trennpfeiler, dessen Lage zum Wehr und dessen elliptische Form des Kopfes [7] die günstigsten Strömungsverhältnisse ergeben hat. Auch bei schiessendem Abfluss zeigten sich keine Ablösungen und schädlichen Wirbel. Die Brücke über der Einlaufschwelle ist als Tauchwand ausgebildet und scheidet bei hoher Wasserführung das grobe Geschwemmsel vom Triebwasser.

Der Einlaufvorplatz und die angrenzenden Bauwerkteile sind stark erosionsgefährdet. Ein Modellhochwasser von 500 m³/s legte die ungeschützten Gründungen des Trennpfeilers und der Einlaufschwelle frei und unterspülte sie. Zu deren Schutze wurde der Einlaufvorplatz mit einbetonierten 2,5-t-Blöcken gepflästert.

Ein Teilproblem, welches bei der Durchführung der Modellversuche in Erscheinung trat, war die Instabilität des Ober-

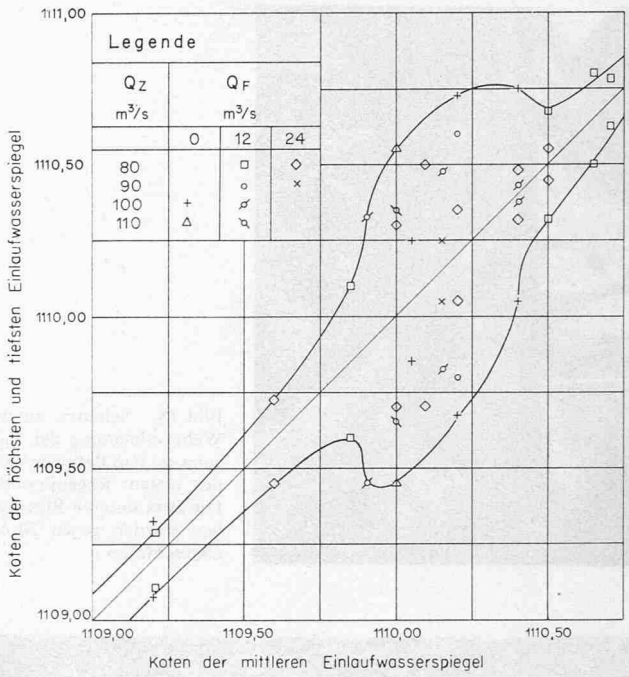
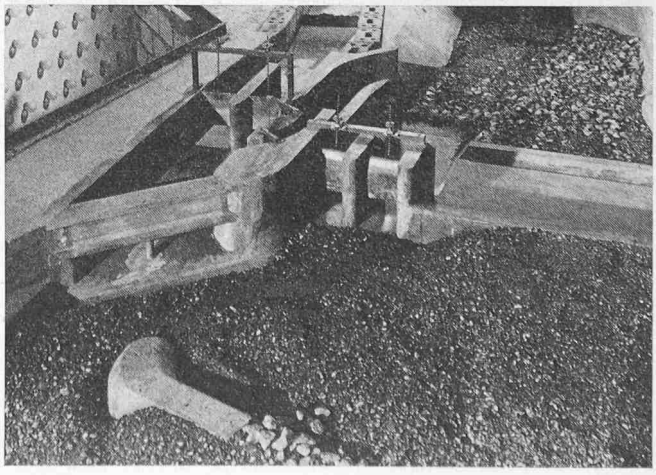


Bild 16. Versuchsergebnisse über die Stabilität des Einlaufwasserspiegels der Fassung am Rio Pativilca

wasser- und Einlaufwasserspiegels. Unter gewissen ungünstigen Betriebsbedingungen konnte ein beträchtliches Auf- und Abschaukeln des Wasserspiegels zwischen Einlauf und gestautem Oberwasser beobachtet werden. Die grössten Wasserspiegeldifferenzen machten immerhin 1,10 m aus, die Schwingungsperioden bis zu einer Minute. Diese Schwankungen sind für den Fassungsbetrieb unerwünscht. Sie können einerseits infolge der erhöhten Wechselbeanspruchungen zu frühzeitigen Ermüdungsbrüchen an den Stahlwasserbauteilen führen. Anderseits wird eine zuverlässige Wasserstandsmeldung der Einlaufwasserspiegel zur Steuerung der Schützen verunmöglicht.

Eine genaue Gesetzmässigkeit wurde der vielen Parameter wegen nicht gefunden, doch zeigten sich grosse Amplituden im Bereich des vorgegebenen Normalstaues (1110,00 m ü.M.) bei kleinen Fassungswassermengen und Zuflüssen von 80 bis 130 m³/s. In Bild 16 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Offenbar werden die Wassermassen in die Stauhaltung unter

Bild 17. Ansicht der Modellfassung Pativilca vom Oberwasser her. Im Unterwasser der Teppich aus 6 t-Blöcken



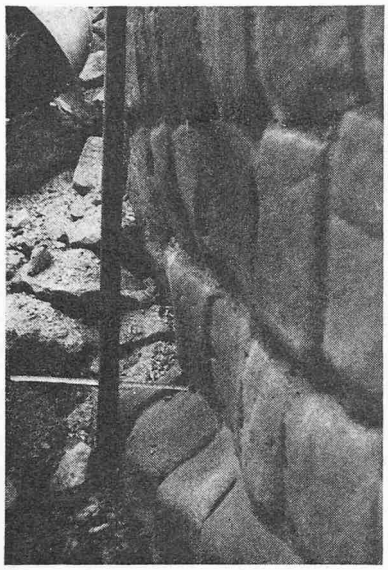


Bild 18. Schäden an der Wehrverkleidung der Fassung am Rio Pativilca nach der ersten Regenperiode. Die zwei unteren Blockreihen wurden gegen 20 cm abgeschliffen

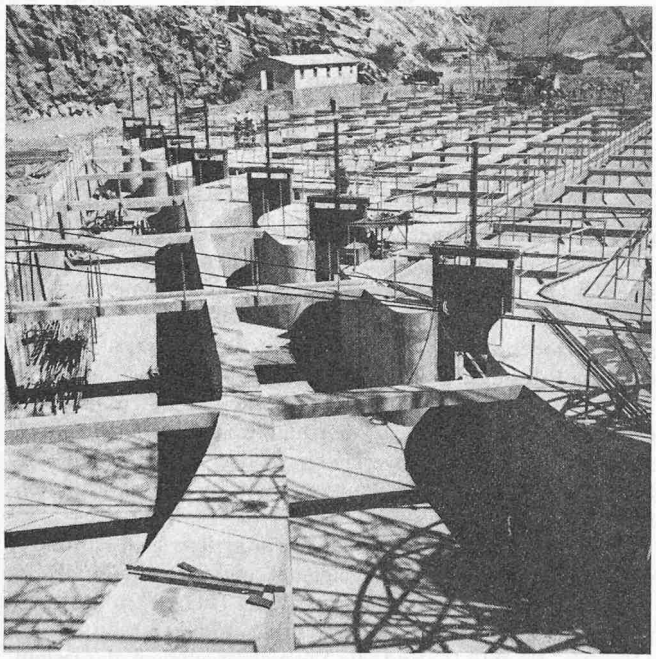
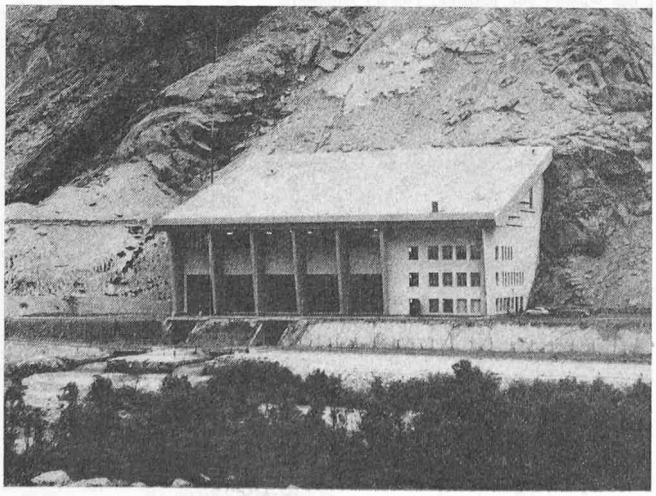


Bild 19. Entsanderverteilkanäle der Fassung Pativilca. Im Hintergrund die Becken mit den Abschlussorganen

Bild 20. Zentrale Cahua am Rio Pativilca mit steinschlagfestem Dach. Installierte Leistung beider Maschinengruppen 40 MW



bestimmten Bedingungen durch den energiereichen Zufluss zu diesen Schaukelbewegungen angeregt. Wegen der raschen Verzögerung der nahezu schiessenden Zuströmung ist der stark ansteigende Wasserspiegel beim Eintritt in die Fassung instabil. Der Wasserspiegel unterliegt in diesem Bereich Pulsationen und verhält sich ähnlich demjenigen eines Wassersprungs. Fällt nun die Frequenz dieser Pulsationen, die sogenannte Störfrequenz, mit der Eigenfrequenz der aufgestauten Wassermassen zusammen, so kommt es zur Resonanz in der Form des auf- und abschaukelnden Wasserspiegels in der Stauhaltung.

Mit der Erhöhung der Normalstaukote um 0,5 m auf 1110,50 m ü.M. konnte dem Resonanzbereich ausgewichen werden (vergleiche Wehrreglement Bild 13). Die Spiegelschwankungen hielten sich hernach in zulässigen Grenzen. Besonders Wasserspiegel in Fassungen an Gebirgsflüssen der beschriebenen Art mit grossen Sohlengefällen neigen zu dieser Instabilität.

In Natur bewegen sich Kieselsteine von 2 bis 3 cm Grösse bereits bei einer kleineren als der doppelten gefassten Wassermenge (48 m^3/s). Die Umlenkung dieser feineren Geschiebekörner bei kleineren Abflüssen gelingt nur teilweise und ist im Modell nicht erfassbar, da die im Massstab 1:40 verkleinerten Körner sich als Schwebstoffe verhalten. Dauert der Aufstau der fraglichen Zuflüsse durch die Wehrschützen länger an, so ist mit dem Anwachsen einer Kiesbank im Oberwasser zu rechnen, die auf den Einlauf zuwandert. Sie ist von Zeit zu Zeit über die Wehrschwelle nach dem Unterwasser wegzuspülen.

Dennoch in die Fassung eindringender Feinkies oder Schlammassen von Huayconiedergängen müssen mittels einer wirksamen Spüleinrichtung aus dem Einlaufkanal abgespült und vom Triebwassersystem ferngehalten werden. Der 12 m breite Einlaufkanal wird von zwei aufeinanderfolgenden Spülrinnen schräg durchquert. Den Abschluss bilden die beiden Tafelschützen an der rechtsseitigen Kanalwand. Der anschliessende Spülkanal durchfährt mit 5% Gefälle den Trennpfeiler und mündet ins Unterwasser. Während der Spülungen werden die beiden Tafelschützen hochgezogen und beide Einlaufschützen in der Fortsetzung des Einlaufkanals geschlossen. Mit Hilfe der Wehrschützen wird die Abflusstiefe im Einlaufkanal auf mindestens 0,40 m aufgestaut. Der Spülvorgang beruht vor allem auf der grossen Schleppkraft, die von den in beiden Spülrinnen entstehenden Wasserwalzen auf die Zungen der in den Einlauf vordringenden Kiesbänke ausgeübt wird. Mit der schraubenförmigen Wasserbewegung dieser Walzen gelangt das Spülgut seitwärts in den Spülkanal. Die Modellversuche zeigten eindrücklich die Leistungsfähigkeit dieser Einrichtung. Auch grosse Steine und Ablagerungen konnten mit einer Spülwassermenge von 20 m^3/s in wenigen Minuten aus dem Spülkanal entfernt werden. Ist der Abfluss des Rio Pativilca und demzufolge auch die Spülwassermenge geringer, so dauert die Spülzeit etwas länger.

Unmittelbar hinter der zweiten Spülrinne ist der Grobrechen angeordnet, dessen Stäbe in einem Abstand von 150 mm zueinander stehen. Im weiteren Verlauf teilt sich der Einlaufkanal in zwei Kanäle von ungefähr der halben Breite. Diese Aufteilung ist notwendig im Hinblick auf allfällige Störungen und Reparaturen an den nachfolgenden Bauwerksteilen. Die Zwischenwand sorgt für einen ausgeglicheneren Zufluss zu den beiden asymmetrisch angeordneten Entsandergruppen. Zwei Dammbalkenverschlüsse ermöglichen das Abschliessen dieser Kanäle. Dahinter befinden sich je ein Feinrechen mit 25 mm Stababstand und eine Rechenreinigungsmaschine. Je eine Sektorschütze dient der Einregulierung des Triebwasserzuflusses. Wird der Rio Pativilca durch den Niedergang von Huaycos plötzlich stark mit schlammigem Material befrachtet, so drängt sich vorübergehend eine Drosselung oder sogar die Schliessung dieser Einlaufschützen auf.

4.4. Die Entsanderanlage

Die Fassung liegt mitten im Wirkungsbereich der grossen Murgänge. Demzufolge sind dem Zufluss oft und schubweise auftretend Schwebstoffe in hohen Konzentrationen beigemengt. Das suspendierte Material ist sehr hart und scharfkantig. Der Entsandung musste daher besondere Bedeutung beigemessen werden. Dem Anlagegefälle von 220 m als angepasst wurde die Ausscheidung des Sandes bis zu einer mittleren Korngrösse von 0,25 mm erachtet. An den Betrieb der Anlage musste die Bedingung nach einem möglichst uneingeschränkten Durchfluss bei guter Entsandung gestellt werden, da das unterirdische Pufferbecken von 30000 m³ Nutzvolumen vor der Drucksetzung die Spülwasserverluste nur teilweise auszugleichen vermag.

Die Anlage im 50 m breiten Talboden zwischen Zufahrtsstrasse und Flussbett (Bild 15) gliedert sich in 2 Gruppen zu je 4 Becken. In der Niederwasserperiode reicht eine Gruppe mit der Kapazität von 4 × 3 m³/s für die Entsandung aus. Gleichzeitig steht die andere Gruppe für Revisionsarbeiten offen. Die rhomboedrische Anordnung der Becken, die 90 m Länge erreicht, soll mit ihrer gestreckten Form hydraulisch günstige Zu- und Abflussverhältnisse schaffen (Bild 19). Der geringe Höhenunterschied von rund 6 m zwischen Ober- und Unterwasserspiegel und die Forderung, wonach die beiden je einer Beckengruppe zugeordneten Spülkanäle 2,0 m über der Flussohle ins Unterwasser ausmünden sollen, erlauben nur 4,1 m grösste Beckentiefe. Eine Holzklotzpflästerung schützt die mit 1,5% fallenden Spülkanäle vor der Erosion des schiessenden und mit Sand gesättigten Abflusses. Das Triebwasser fliesst auf der linken Talseite längs der Strasse in einem 150 m langen, gedeckten Kanal zum Stollen. Ein Überlaufbauwerk vor dem Stollenportal sichert die Anlage vor einer Überflutung.

Die Wirksamkeit der Entsanderanlage verschlechtert sich mit zunehmendem Volumen des abgesetzten Sandes. Bei einer maximal zulässigen Ablagerungshöhe von 1,0 m kann der angestrebte Entsandungsgrad für das kleinste gewünschte Korn von 0,25 mm nicht mehr erreicht werden (Tabelle 2). Um in Zeiten starker Schwebstoffführung einen zu raschen Spülrhythmus und eine Beeinträchtigung des Triebwasserdurchflusses zu vermeiden, verfügen die Becken über einen reichlichen Ablagerungsraum. Auch dann beträgt der Spülverlust noch mehr als 10% des Triebwasserbedarfes, und er muss durch eine grössere Wasserentnahme ausgeglichen werden. Indem der Wasserspiegel mittels Staubohlen am Überlauf um 30 bis 50 cm aufgestaut wird, lassen sich die vorgenannten Nachteile beheben. Die Durchflussmenge kann auf diese Art bei gleichem Absetzvermögen des Beckens auf 3,5 m³/s gesteigert werden, wodurch der Vollastbetrieb mit nur 7 Becken möglich wird, während am achten Becken Spülungen vorgenommen werden können.

4.5. Die Steuerung der Fassungsanlage

Alle Verschlussorgane werden ölhydraulisch angetrieben. Die Ölpumpen, die Steueraggregate und die übrigen elektrischen Einrichtungen sind im Apparatehaus untergebracht. Die Fernsteuerung der Einlauf- und der Wehrschützen richtet sich nach dem automatisch übermittelten Wasserstand dreier hierzu eingerichteter Messstellen. 2,5 km oberhalb der Fassung wird der natürliche Abfluss des Rio Pativilca gemessen. Diese Station liefert die Werte über den Zufluss zur Einstellung der Wehrschützen gemäss Wehrreglement (Bild 13). Ausserdem wird das Herannahen von Hochwasserwellen zusätzlich gemeldet, damit die Wehrschützen rechtzeitig geöffnet werden können. Weiter wird zur Einhaltung des Wehrreglementes eine Angabe über den Stauspiegel der Fassung benötigt. Dieser Wasserstandswert wird im Vorbecken kurz vor der Einlaufschütze gemessen. An der dritten Messstelle im Stollenzulaufkanal wird die zugeführte Triebwassermenge gemessen, welche sich über ein Fernsteuerungskabel mittels der Wehr- und Einlaufschützen von der Zentrale aus einregulieren lässt.

Zurzeit überwacht ein ständiger Fassungswart die Anlage und nimmt die Spülungen vor. Während der Hochwasserperiode erfordern auch die Rechenreinigungsarbeiten seine Aufmerksamkeit. Im Apparatehaus ist der Raum für eine zukünftige vollautomatische Steuerung eingeplant.

4.6. Bisherige Betriebserfahrungen

Die starken Erdbebenstösse des Jahres 1970, die im angrenzenden Santatal zu schweren Zerstörungen und Katastro-

Tabelle 1. Technische Daten der Anlagen Pativilca und Matucana in Peru

	Einheit	Pativilca	Matucana	
Einzugsgebiet				
Fläche	km²	3250	575	
Flussregime				
Höchsthochwasser	m³/s	1500	300	
Jahresmittel	m³/s	46,3	12,0	
Niederwasser	m³/s	9,1	4,9	
Geschiebetriebbeginn	m³/s	60	20	
Flussgefälle bei der Fassung	‰	15	24	
Grösstes Geschiebekorn	m	0,30	0,60	
Fassung				
Normalstau	m ü.M.	1110,00	2927,65	(2927,80)
Fassungswassermenge	m³/s	24	12	(18)
Anzahl, Breite der Schützen				
Wehr	m	2 × 5,0	1 × 6,0	
Einlauf	m	2 × 5,0	1 × 7,0	
Spülkanal	m	2 × 2,5	1 × 4,0	
Freispiegelstollen				
Länge	km	8,01	19.37	
Breite unverkleidet (verkleidet)	m	3,50	3,00	(2.60)
Sohlenneigung	‰	2,0	2,6	
Schluckvermögen	m³/s	24	13,5	(20)
Anzahl Fenster		1	5	
Unterirdisches Pufferbecken (Pulmón)				
Normalstau	m ü.M.	1092,28	2872,50	
Nutzvolumen	m³	30000	30000	(60000)
Kammerbreite	m	6,0	8,0	
Kammerlänge	m	1500	500	(2 × 500)
Druckschacht				
Rohrdurchmesser	m	2,6–2,4	2,2–1,8	
Rohrwandstärke	mm	10–14	14–33	
Neigung der Schrägstrecke	%	80	80	
Länge der Schrägstrecke	m	339	1530	
Anzahl Fenster		–	4	
Bruttogefälle	m	219,2	987,1	
Zentrale				
Turbinen				
Achse	m ü.M.	873,00	1885,39	
Anzahl, Leistung	kW	2 × 20,5	4 × 30	(6 × 30)
Typ		Francis vert. Achse	Pelton Zwilling hor. Achse	
Drehzahl	Min⁻¹	600	450	
Ausbauwassermenge	m³/s	24	15	(22,5)
Generatoren				
Anzahl, Leistung	kVA	2 × 27,5	2 × 80	(3 × 80)
Transformatoren				
Anzahl, Leistung	kVA	2 × 27,5	3 × 53,3	
Phasen		3	1	
Übersetzungsverhältnis	kV/kV	10/138	12,5/220	
Jahresproduktion	GWh	280	560	

Die eingeklammerten Werte beziehen sich auf den zukünftigen Vollausbau des Kraftwerkes Matucana.

Tabelle 2. Entsanderanlagen am Rio Pativilca und am Rio Rimac

		Einheit	Entsanderbecken Pativilca	Entsanderbecken Matucana	Unterirdisches Pufferbecken Matucana
Anzahl Becken			8	3 (5)	1 (2)
Beckenlänge		m	50	58	500
davon wirksam		m	30	45	300
Beckenbreite		m	5,4	6,0	8,0
Beckentiefe		m	4,8	5,9	9,5–17,5
Sohlengefälle		%	2,0	1,5	1,0/1,5
Normalstau		m ü.M.	1109,70	2927,55	2872,50
Senkziel		m ü.M.			2864,00
Breite des Überlaufes		m	2,0	2,5	25
Breite der Spülrinne		m	3,5–2,0	2,4	3,0
Tafelschützen:	Einlauf ($b \times h$)	m × m	1,6 × 2,0	2,0 × 2,4	2,2 × 2,0
	Spülöffnungen ($b \times h$)	m × m	1,2 × 1,2	1,5 × 1,5	1,0 × 1,5
Durchfluss:	bei Normalbetrieb	m^3/s	3,0	4,0 (3,6)	12,0 (9,0)
	mit Staubohlen	m^3/s	3,5	4,5 (4,0)	
Grösste Ablagerungshöhe		m	1,0	1,0	3,0
Grösstes Absetzvolumen		m^3	180	150	5000
Benetzter Querschnitt:	gespültes Becken	m^2	15,0–17,0	20,9–22,7	68,0–108,0
	voller Absetzraum	m^2	10,7–14,2	18,1–20,3	65,0–92,0
Durchflussgeschwindigkeit:	gespültes Becken	m/s	0,20–0,18	0,19–0,17	0,17–0,11
	voller Absetzraum	m/s	0,28–0,21	0,22–0,20	0,18–0,13
Absetzbares Korn:	gespültes Becken	mm	0,20–0,17	0,20–0,16	0,15–0,07
	voller Absetzraum	mm	0,30–0,22	0,25–0,20	0,20–0,10
Spülzeit		Min	15	13	180–240
Spülintervall bei:	1 % Schwebstoffgehalt	h	11	7	72
	4 % Schwebstoffgehalt	h	2	1,3	16
Spülverlust:	pro Spülung,	$10^3 m^3$	2,0–2,4	3,0	60–70
	im Verhältnis zur Triebwassermenge	%	0,5–12,0	1,0–15,0	0,3–5,5

Die eingeklammerten Werte beziehen sich auf den zukünftigen Vollausbau des Kraftwerkes Matucana.

phen geführt haben, wurden von den Fassungsbauwerken am Rio Pativilca gut überstanden. Obwohl die Zugangsstrassen stark verschüttet wurden, zeigten die Bauwerke keine Beschädigungen. Die vorsichtig durchgeführte Bemessung und Anordnung von Bewegungsfugen haben sich bewährt.

Eine stärkere und längere Hochwasserperiode während der Beendigung der Bauarbeiten am Wehr zwang zur Wasserumleitung durch die unfertigen Wehröffnungen und den Einlaufspülkanal. Die Abflussspitze erreichte 350 m^3/s. Der gemessene Schwebstoffgehalt betrug bis zu 4 Volumenprozente bzw. 100 kg Feststoffe pro m^3 Wasser. Nach dem Abklingen des Hochwassers zeigten sich folgende Schäden:

Verursacht durch die Fangdämme des Bauzustandes entstanden unerwartete Zuströmungsbedingungen vor den Wehrschützenöffnungen. Der eingeschnürte und schiessende Wehrdurchfluss erzeugte längs des Trennpfeilers einen kräftigen Wirbel, der einen 3 m tiefen Graben durch die Wehrschwelle, den Wehrrücken und die anschliessende Tosbeckenplatte auszufressen vermochte. Steinverkleidung und Armierungseisen wurden zerstört. Auch an der Wand des Trennpfeilers wurde die Steinverkleidung bis zu 20 cm herausgeschliffen (Bild 18). Ein zweiter Wirbel bei der Ausmündung des überlasteten Spülkanals riss die Blöcke aus dem Blockteppich und erzeugte ein 7 m tiefes Kolkloch unterhalb des Tosbeckens.

Ein erstes Mal zeigte sich die zerstörende Wirkung des scharfkantigen Sandes vom Rio Pativilca. Der aussergewöhnliche Betriebszustand des Wehres als Ursache der unvorhergesehenen Wirbel begünstigte vermutlich noch die Erosionen. Die Instandstellungsarbeiten erfolgten mit Sorgfalt, besseren Materialqualitäten und verstärkten Steinverkleidungen. Der Blockwurf am Fusse des Tosbeckens wurde entsprechend den Ergebnissen der Modellversuche mehrschichtig fertiggestellt. Ähnlich den Schützenauflagern erhielten auch die seitlichen Führungen der Wehrschützen eine umgebende Pflästerung aus Pinienholz.

Da das Kraftwerk Pativilca ein selbständiges Netz im Inselbetrieb speist, ist ein Unterbruch in der Energieerzeugung besonders unerwünscht. Seit ihrer Inbetriebnahme steht die Anlage deshalb pausenlos in Betrieb. Die Aufrechterhaltung des Betriebes unter Vollast in Zeiten grosser Abflüsse und Murgänge hat vor allem an den vom Wasser durchströmten Maschinenteilen ihre Auswirkungen gezeigt. Durch die Schwebstoffe stark angefressen wurden insbesondere die Schaufeln und der Leitapparat der beiden Francisturbinen in der Zentrale Cahua (Bild 20). Bereits nach 2000 Betriebsstunden wurden erste Revisionen an diesen Teilen fällig.

Nachträgliche Schwebstoffmessungen in der Entsanderanlage ergaben zwar einen den Erwartungen entsprechenden guten Entsandungsgrad für das gewünschte kleinste absetzbare Korn von 0,25 mm. Der Prozentsatz der noch kleineren Körner bis hinunter auf 0,05 mm war jedoch ausgesprochen gross. Studien über die Verbesserung der Betriebsbedingungen sind deshalb im Gange.

Mit den Hochwasserabflüssen fällt eine grosse Menge Geschwemmsel, insbesondere dürres Gras aus dem Hochland an, dessen Entfernung aus den Rechen das Bedienungspersonal zeitweise stark beanspruchte. Der nachträgliche Einbau einer Rechenreinigungsanlage brachte eine merkliche Erleichterung der Wartungsarbeiten mit sich. *Fortsetzung folgt*

Projekt der Wasserkraftanlagen Pativilca und Matucana: Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden.

Bauleitung: Motor-Columbus S. A., Lima/Peru.