

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 95 (1977)
Heft: 11

Artikel: Pumpspeichieranlage Rodund II
Autor: Innerhofer, G. / Eder, A. / Gstettner, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73348>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 21.12.2024

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

Pumpspeicheranlage Rodund II

Von G. Innerhofer¹⁾, A. Eder²⁾ und R. Gstettner³⁾, Vorarlberger Illwerke AG, Schruns

Die Wasserkraft-Werkgruppe der Vorarlberger Illwerke in Westösterreich arbeitet mit dem mitteleuropäischen Verbundnetz zusammen. Die Gesellschaft hat die bestehende Kraftwerkgruppe durch eine bemerkenswerte Pumpspeicheranlage ergänzt. Das neue Kraftwerk Rodund II ist im März 1976 in Betrieb gegangen⁴⁾.

1. Überblick über die Anlagen der Vorarlberger Illwerke

Die Ill weist ein Einzugsgebiet von 1281 km² auf; davon sind 14 km² vergletschert. Die Vorarlberger Illwerke sind mit dem Ausbau und der Nutzung der Wasserkräfte dieses Einzugsgebietes betraut. Die Gesellschaft wurde im Jahre 1924 mit dem Ziel gegründet, einen Verbundbetrieb zwischen den Wasserkraften der Alpen und den Braunkohlenkraftwerken des Ruhrgebietes aufzubauen. Diese für damalige Zeiten grosszügige Konzeption ermöglichte schon frühzeitig die Anlage von Grosskraftwerken in Vorarlberg und bestätigte sich seit über 40 Jahren in dem sich ständig über die Grenzen ausbreitenden Grossverbund. Die Anlagen sind durchweg als gut regelbare Speicherkraftwerke ausgebaut. Derzeit sind 1124 MW Turbinenleistung und 523 MW Pumpleistung installiert. Das Jahresarbeitsvermögen beträgt 1900 GWh.

Bild 1 zeigt einen Lageplan der Illwerke-Anlagen mit dem Vermuntwerk, 148 MW (1930), dem Rodundwerk I, T 173 MW, P 40 MW (1943), dem Pumpspeicherwerk Lünensee, T 230 MW, P 220 MW (1958) und dem Kopswerk, 245 MW (1969) sowie den kleineren Werken Obervermunt, Latschau und Rifa mit zusammen 48 MW.

Die seit der Inbetriebnahme des Rodundwerkes I ausgeführten Speicher- und Bachüberleitungen haben dessen Wasserdargebot im Sommer um 28% und im Winter um 133% erhöht. Damit hatte das Rodundwerk I den Charakter eines Spitzenkraftwerkes weitgehend verloren, so dass die Erstellung eines Parallelwerkes zu untersuchen war. Die günstigen topographischen Voraussetzungen legten es nahe, dieses Werk als Pumpspeicherwerk auszubilden und seine Leistung weit über das für die Abarbeitung des natürlichen Zuflusses erforderliche Mass zu erhöhen.

Eingehende Studien haben zu den in Tabelle 1 angegebenen Hauptdaten geführt, wobei vor allem die gegebenen topographischen Voraussetzungen für die Errichtung der Becken massgebend waren.

Die beiden Werke arbeiten zum Teil im Durchlaufbetrieb mit den oberliegenden Werken Vermunt, Kops und Lünensee und erhalten, ohne das Oberbecken zu belasten, einen bedeutenden Zufluss während der Betriebszeit. Das Rodundwerk II wird jährlich etwa 311 GWh aus dem Zufluss erzeugen. Die entsprechende Wassermenge wird dem Rodundwerk I entzogen, das damit eine kürzere Benutzungszeit und die für die Spitzendeckung und Leistungsfrequenzregelung erwünschte, erhöhte Freizügigkeit erhält. Im weiteren ist das Rodundwerk II für den Tageswälzbetrieb und darüber hinaus – in Ver-

bindung mit dem Lünerseewerk – auch für eine Wochenendpumpspeicherung einsetzbar. Die Jahreserzeugung aus der Pumpspeicherung Rodund II wird mit 255 GWh geschätzt. Davon werden 80 GWh im Rodundwerk I und 175 GWh im Rodundwerk II abgearbeitet.

2. Das Oberbecken

Die Anordnung des Oberbeckens ist aus Bild 2 ersichtlich. Das neue Staubecken Latschau II ist vom bestehenden Becken I durch einen Damm getrennt, dessen Krone 5,0 m tiefer als das Stauziel liegt. Der mit einer Regulierschütze ausgerüstete «Verbindungsstollen» verbindet die beiden Beckenteile in ihrem Sohlbereich. Der «Umleitungskanal» erlaubt die Einleitung des Zuflusses unmittelbar in das Becken II.

Die unter der Krone des Zwischendamms liegenden Beckenteile sind so gross, dass in den Rodundwerken I bzw. II mit den zugeordneten Becken ein – allerdings in seiner Freizügigkeit etwas eingeschränkter – Betrieb möglich ist, wenn die andere Kraftwerkanlage in Revision steht. Die 30 Jahre alte, mit Betonplatten abgedeckte Bitumenpapp-Auskleidung des Beckens I ist durch eine Asphaltbetondichtung ersetzt worden. Da diese Erneuerung noch vor Inbetriebnahme des Rodundwerkes II auszuführen war, wurde das Wasser über das Becken II dem Rodundwerk I zugeführt. Dessen Einlaufbauwerk war hierfür von seinem Becken durch den «Behelfsdamm» abzutrennen.

Das Becken II wird durch einen 50 m hohen Damm mit rund 1,0 Mio m³ Inhalt abgeschlossen und ist mit einer Asphaltbeton-Oberflächendichtung ausgekleidet. Für die Dammschüttung stand eine verhältnismässig feinteilmige Moräne aus der Schlussvereisung sowie Felsausbruch und Material aus Deponien, die beim Bau des Rodundwerkes I und des Lünerseewerkes angelegt worden sind, zur Verfügung. Von dem Depo-

Tabelle 1. Auslegungsdaten für die Rodundwerke

		I	II
Engpassleistung Turbinen	MW	173	270
Turbinenbetrieb			
mittlere Vollastdurchfluss	m ³ /s	60	85
mittlere Leistung Pumpbetrieb	MW	40	249
mittlerer Förderstrom Pumpbetrieb	m ³ /s	10	67
maximale Rohfallhöhe	m		354
Nutzzinhalt des Oberbeckens	Mio m ³		2,3
gespeicherte Turbinenbenutzungsstunden	h		4,5
Nutzzinhalt Unterbecken	Mio m ³		2,0
gespeicherte Pumpbenutzungsstunden	h		7,2

¹⁾ Projektingenieur Bauwesen.

²⁾ Chefsingenieur Maschinenbau.

³⁾ Chefsingenieur Elektrotechnik.

⁴⁾ Nach einer ersten Veröffentlichung, erschienen in englischer Sprache in «Water Power» 25 (1973), Nr. 11, S. 413-427.

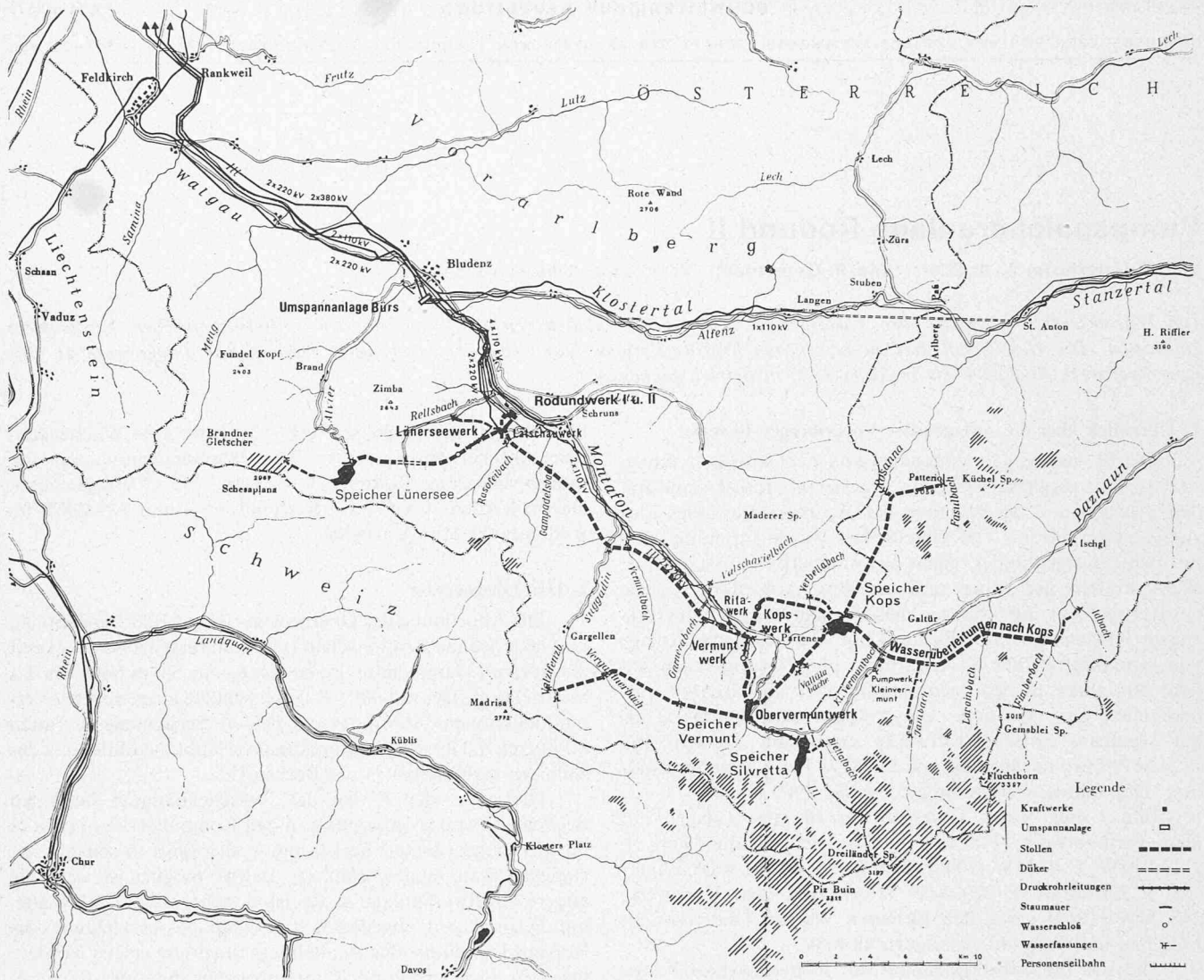


Bild 1. Lageplan der Illwerke

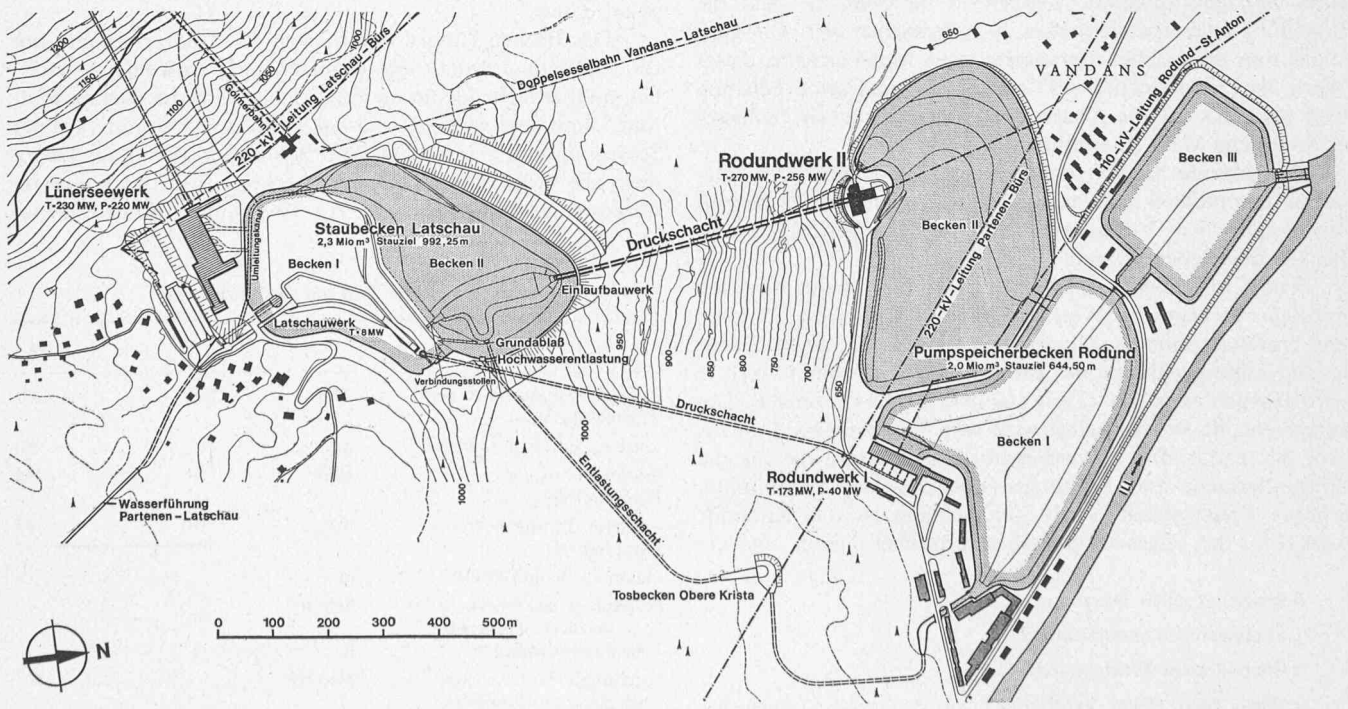


Bild 2. Übersichtsplan der Rodundwerke I und II, 1:14 000

niematerial mussten trotz verhältnismässig günstigem Kornaufbau ungefähr 200000 m³ wegen zu hohem Wassergehalt ausgeschieden werden. Der Damm wurde als Homogendamm ausgeführt, obwohl ein Grossteil des Schüttgutes wenig durchlässig ist. Besonders in vertikaler Richtung ergab sich eine geringe Durchlässigkeit, da das nachträgliche Befahren der Schüttlagen mit Transportfahrzeugen dichte Schichten ergeben hat. Dagegen ist eine grössere Durchlässigkeit in Bereichen des Felsausbruchmaterials gegeben. Die wichtigste Überwachungsaufgabe bei der Bauausführung war die zweckmässige Auswahl und die nach statischen Gesichtspunkten und nach den Erfordernissen der Baustelle geeignete Widmung des Schüttgutes.

Die Böschungsneigung an der Wasserseite beträgt 1:1,7, an der Luftseite 1:1,5. Für die Berechnung des an der Oberfläche abgedichteten Damms wurde eine Sicherheit von 1,22 zugrunde gelegt; für den durchströmten Damm eine Sicherheit von 1,1. Eine Durchströmung wäre nur bei völliger Zerstörung der Dichtung möglich. Es träten aber auch dann durch die drainierende Wirkung der durchlässigen Zonen günstigere als der Berechnung zugrunde gelegte Porenwasserdrücke auf.

Nach einigen Vorversuchen wurde die Schüttlagenhöhe mit 60 cm begrenzt. Daraus ergab sich die grösste zulässige Steingrösse mit 50 bis 60 cm Kantenlänge. Die Verdichtung mit 8,5 t und 10 t Rüttelwalzen in 6 Durchgängen war auch bei einem Wassergehalt, der geringer als der optimale war, zureichend. Auf eine Benetzung dieser Lockermassen konnte daher im Interesse der Schütтарbeiten verzichtet werden. Für die Moräne wurde ein mittleres Trocken-Raumgewicht von 2,40 t/m³ gegenüber einer Proctordichte von 2,35 t/m³ erzielt.

Der Porenwasserdruck im feuchten undurchlässigen Schüttgut erreichte nach den ersten Schüttlagen über 100%, bei weiterer Überschüttung stieg aber der absolute Porenwasserdruck nur wenig an, so dass der relative \bar{B} -Wert rasch auf 10% und darunter absank. Die Setzungen des Damms und des Dammuntergrundes betragen nur wenige cm. Da-

gegen werden nach den bisherigen Ergebnissen in jenem Teil der Beckensohle, wo auf bestehendes Deponiematerial geschüttet worden ist, Setzungen bis 20 cm erwartet.

In der Beckensohle besteht die Asphaltbeton-Dichtung aus einer 5 cm starken Unterschicht mit 4,5% Bitumengehalt und einer 6 cm starken Oberschicht mit 7,6% Bitumengehalt. Die wasserseitige Dammböschung wurde mit Bagger und Raupen planiert. Als Ausgleich- und Drainageschicht wurde eine 10 cm starke Schicht aus gebrochenem Felsmaterial 0-60 mm aufgebracht, mit Rüttelwalzen verdichtet und mit Teer stabilisiert. Der Asphaltbeton besteht aus einer 6 cm starken Unterschicht mit 4,5% Bitumengehalt und 10% Porenvolumen und einer einlagig aufgetragenen, 8 cm starken Dichtungsschicht mit 7,6% Bitumengehalt und 1 bis 3% Porenvolumen.

Als Zuschlagstoff wurden vorwiegend saure Gesteine aus dem Kristallin verwendet. Eingehende Untersuchungen klärten die Haftung zwischen Gestein und Bitumen, wobei die Abnahme der Würfeldruckfestigkeit eines hohlraumreichen Gemisches nach 24 Stunden Wasserlagerung als ein geeignetes Mass für die Beurteilung der Eignung erachtet worden ist. Diese Untersuchungen ergaben, dass sich die Beigabe von Kalksteinmehl als Füller in der Dichtungsschicht und von hydraulischem Kalk in die Unterschicht günstig auswirken. Auf die Beigabe von chemischen Haftmitteln wurde verzichtet. Die Untersuchungen führten zur Auswahl einer bestimmten Bitumensorte. Es scheint ein allgemeines Problem des Asphaltwasserbaues zu sein, dass die Raffinerien, vielleicht bedingt durch unterschiedliche Rohöllieferung, weniger konstant als noch vor einigen Jahren liefern.

Das Einlaufbauwerk des Rodundwerkes II ist für 90 m³/s bemessen; es befindet sich in der dem Krafthaus nächstgelegenen Beckenecke. Der trichterförmige Einlauf (Bild 3) geht ohne besonderen Knick in die obere Steilstrecke des Druckschachtes über. Hydraulische Grundsatzversuche, die im Oskar-von-Miller-Institut der TH München ausgeführt worden sind, haben ergeben, dass ein einwandfreies hydraulisches Verhalten

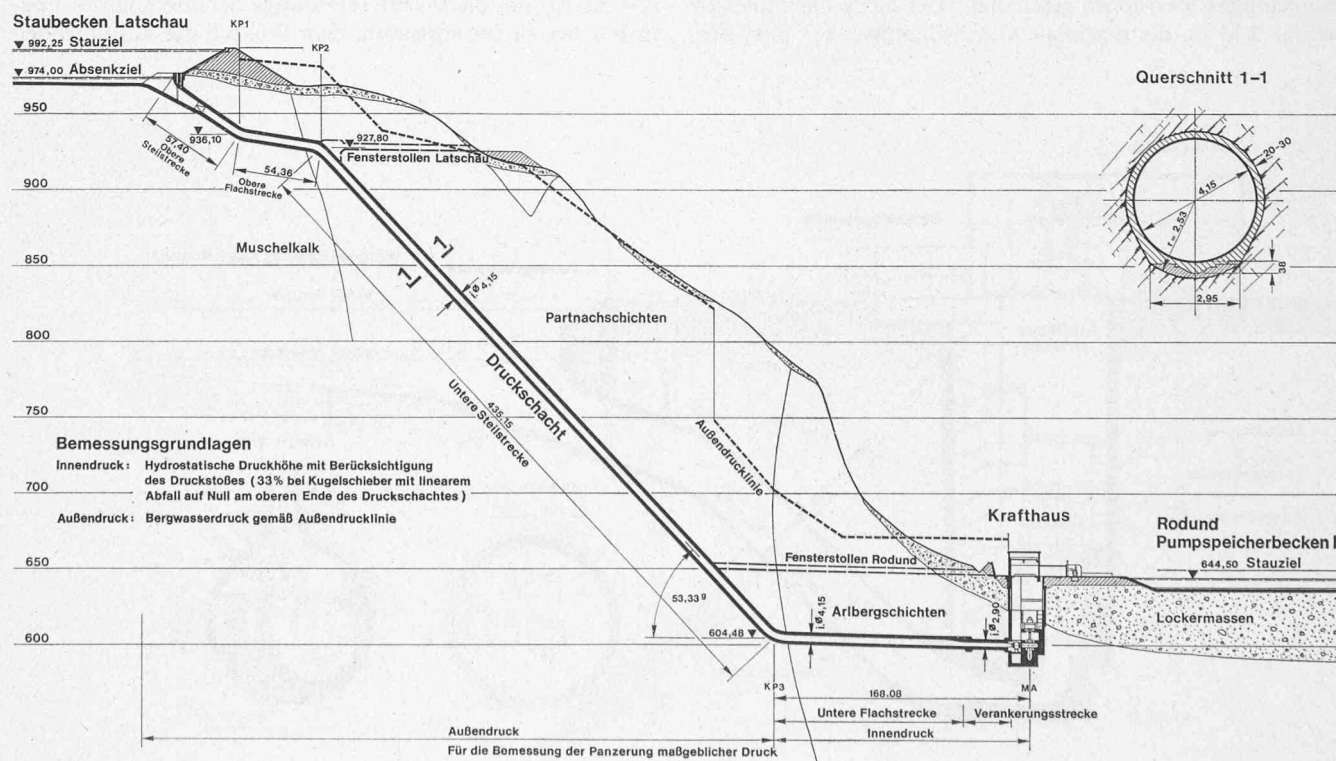


Bild 3. Längenschnitt durch den Druckschacht, 1:5000

Tabelle 2. Bewertung der verschiedenen Varianten

Variante	1	2	3	4	5	6	7
Baulicher Teil	43	50	51	45	51	50	59
Maschinentechnischer Teil	26	26	42	51	37	55	40
Elektrotechnischer Teil	31	41	29	29	29	37	42
Gesamtes Krafthaus	100	117	122	125	117	142	141

gewährleistet ist. Die wesentlichen Konstruktionsmerkmale, die die Gefahr lufteinziehender Wirbel vermindern, sind gegeben. Es sind das: Rinnenartiger Zulauf, wenig Raum für die Entwicklung einer Zirkulationsströmung hinter dem Einlauf und schnell wachsende Überdeckungshöhe mit enger werdendem Querschnitt.

Das Einlaufbauwerk ist mit einem Rechen ausgerüstet. In den Nischen oberhalb des Einlaufquerschnittes sind Damm- tafeln angeordnet, die bei Absenksziel mit hydraulischen Hebe- vorrichtungen abgelassen bzw. gehoben werden können. Auf die Anordnung eines Betriebsabschlussorganes wurde ver- zichtet, da die Wasserführung zur Gänze im Gebirge liegt und damit dem Sicherheitsbedürfnis genügt.

Die Hochwasserentlastung war erforderlich, da bei Stö- rung der Rodundwerke der über einen Freispiegelstollen bei- geleitete Zufluss schadlos abgeleitet werden muss. Sie vermag 48 m³/s abzuführen und besteht aus drei gestaffelt anspringen- den Hebern, die in den bestehenden Entlastungsschacht mün- den. Der Grundablass vermag 25 m³/s abzuführen und schliesst an denselben Entlastungsschacht an. Sein Einlaufbauwerk und die Schützenkammer sind zu einem Bauwerk zusammen- gefasst.

3. Die Oberwasserführung

Die Oberwasserführung (Bild 3) ist 677 m lang (gemessen vom Ende des Einlaufkonus bis Kugelschieberflansch), liegt zur Gänze im Gebirge und ist gepanzert. Der Fensterstollen Latschau war erforderlich, da die Hauptarbeiten im Druck- schacht auszuführen waren, als das Becken Latschau bereits voll bewirtschaftet wurde. Mit der Anordnung eines Mann- loches im Knickpunkt KP2 wurde die Möglichkeit späterer unabhängiger Revisionen geschaffen. Der lichte Durchmesser beträgt 4,15 m, die maximale Geschwindigkeit 6,7 m/s. Für

die Wahl des Durchmessers waren allein wirtschaftliche Über- legungen massgebend. Bei der kurzen und steilen Wasser- führung waren damit alle Forderungen der Regelbarkeit erfüllt.

Der Druckschacht ist zur Gänze auf Aussendruck bemes- sen. Für die Panzerung wurden Bleche mit Wandstärken von 10 bis 29 mm der Güte Aldur 35 bis Aldur 58 und Aldur 45/60-58/72 verwendet. Bis zu einem Aussendruck von 70 m Wassersäule erwies sich die glatte Panzerung, für grössere Aussendrucke aber eine Verigelung als wirtschaftlich. Als Variante wurde die Lösung mit einer Entlastung durch eine Drainage untersucht. Da der Kostenunterschied jedoch nur gering war, wurde für die sicherere Lösung entschieden. Die sich ergebenden Wandstärken reichen für die Aufnahme des Innendruckes aus, wobei ein Gebirgsverformungsmodul von nur 30000 kp/cm², das ist sicher weniger als tatsächlich vor- handen, ausreichen würde.

Die Rohre sind in Halbschalen antransportiert, über Tag zu 8 m Schüssen zusammengeschweisst und dann ein- gefahren worden. Die Panzerung wurde mit Gussbeton, hinterbetoniert. Auf eine Injektion konnte verzichtet werden, da für die Innendruckaufnahme hinreichende Reserven vor- liegen und andererseits eine Injektion in Verbindung mit einer Verigelung als nicht sinnvoll erscheint. Es wurden aber Mass- nahmen ergriffen, die verhindern sollen, dass sich bei entleer- tem Rohr über einen Spalt zwischen der Panzerung und dem Beton längs des Schachtes ein Wasserdruck aufbauen kann. Hierfür wurden bei den Fensterstollen Entlastungsdrainagen und in der Mitte des Schachtes zwei Sperringe angeordnet. Der Druckschacht liegt in den Partnachmergeln und den Arl- bergschichten der mittleren Trias. Das Gestein erwies sich als günstig für den Schachtbau.

Der Aufbruch des Richtschachtes erfolgte mit einem elektrisch angetriebenen Alimak-Gerät, wobei eine durch- schnittliche Leistung von 6 Steigmeter je Arbeitstag erreicht worden ist. Es war hiebei keine Sicherung erforderlich.

Der Vollaubruch wurde fortschreitend von oben nach unten, Hand in Hand mit einer vollständigen Spritzbeton- sicherung des Profils und dem Sohlbeton mit dem Montage- gleis ausgeführt. Die Neigung der unteren Steilstrecke beträgt 52°. Sie ist, um die sichere selbsttätige Schutterung des Fels- ausbruches zu gewährleisten, dem Wunsch der ausführenden

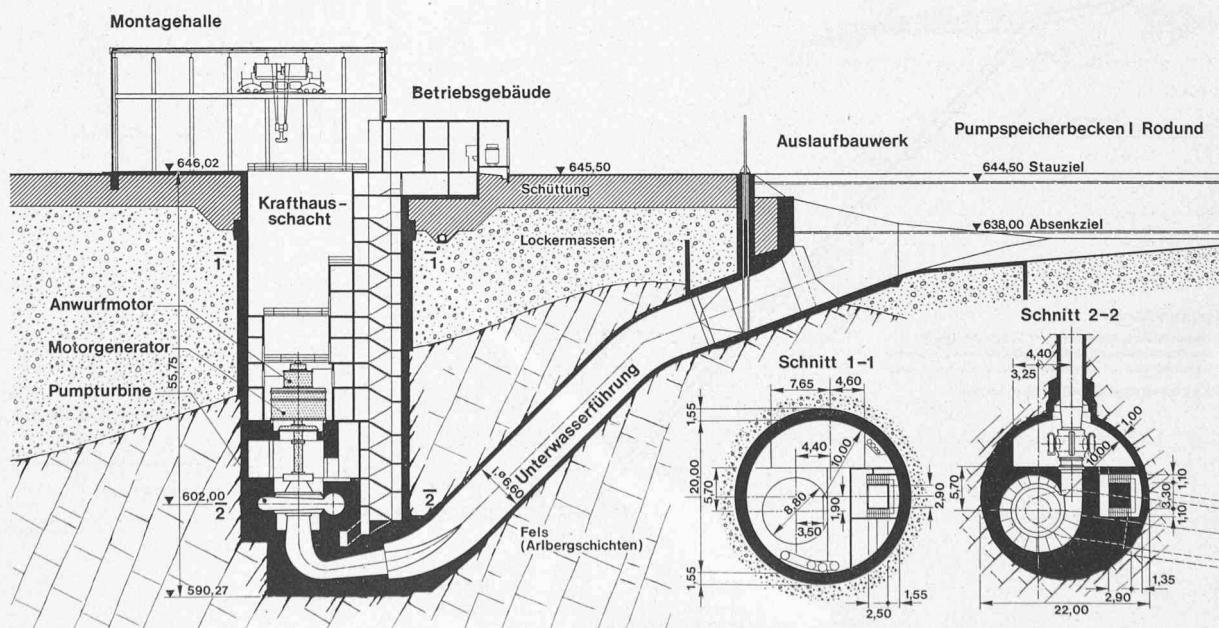


Bild 4. Querschnitt durch den Krafthaus-schacht mit Unterwasserführung, 1:1000

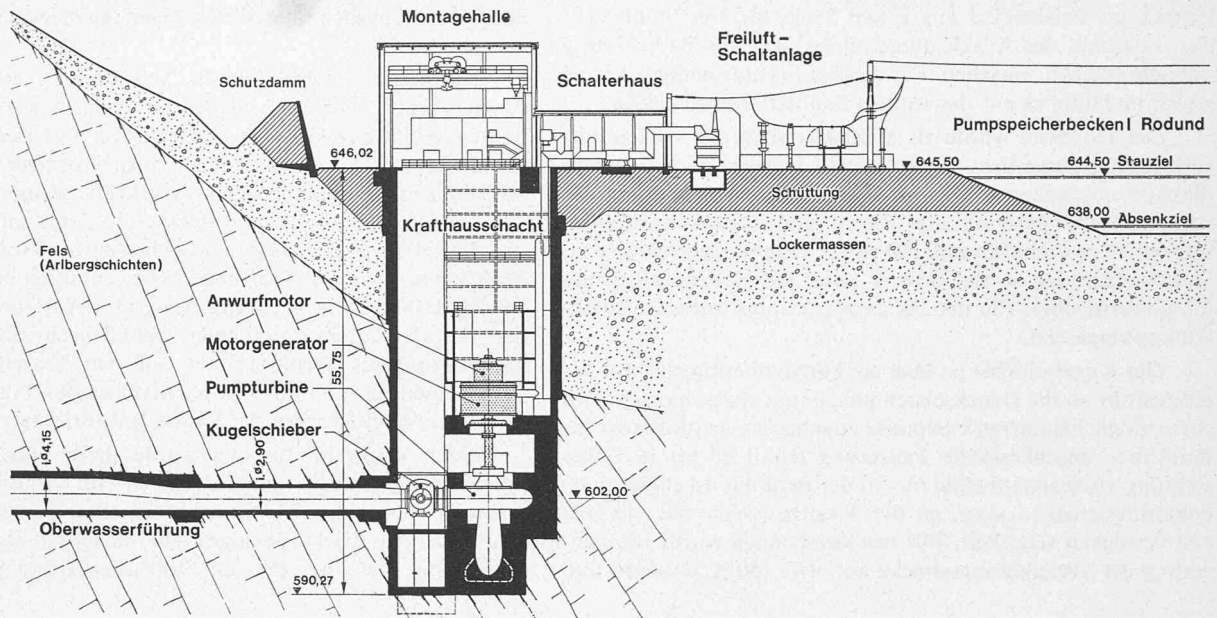


Bild 5. Längenschnitt durch Krafthauschacht mit Oberwasserführung, 1:1000

Firma entsprechend, steiler als ursprünglich geplant ausgeführt. Der Ausbruch am Fuss des Schachtes wurde mit einem 1,7 m³ Radlader abtransportiert. Ein Schuttersilo war somit nicht erforderlich.

4. Das Krafthaus

Vor einer Entscheidung über die Bauweise des Krafthauses wurden verschiedene Lösungen miteinander verglichen. Aus einer grossen Anzahl studierter Varianten gleicher Kraftwerkleistung sollen nachstehend die wichtigsten genannt werden.

- 1) eine vertikalachsige Pumpturbine (375 U/min) in einem Schachtkrafthaus
- 2) zwei vertikalachsige Pumpturbinen (600 U/min) in einem Schachtkrafthaus
- 3) ein vertikalachsiger Maschinensatz (375 U/min) mit Francis turbine, Anfahrwandler und einstufig einflutiger Pumpe in einem Schachtkrafthaus
- 4) ein vertikalachsiger Maschinensatz (375 U/min) mit Francis turbine, Anfahrwandler und zweistufig zweiflutiger Pumpe in einem Schachtkrafthaus
- 5) ein vertikalachsiger Maschinensatz (375 U/min) mit Francis turbine und einstufig einflutiger Pumpe, beide starr gekuppelt, in einem Schachtkrafthaus
- 6) ein horizontalachsiger Maschinensatz (375 U/min) mit Francis turbine und zweistufig zweiflutiger Pumpe, beide starr gekuppelt, in einer Kaverne
- 7) zwei horizontalachsige Maschinensätze (500 U/min) mit Francis turbine, Anfahrwandler und einstufig einflutiger Pumpe in einer Kaverne.

In der Tabelle 2 sind für die genannten Varianten die Kostenfaktoren für den baulichen, den maschinellen und den elektrotechnischen Anlagenteil sowie die Gesamtkosten des Krafthauses angegeben. Mit 100% wurde die gewählte, in den Kosten günstigste Lösung einer Pumpturbine in einem Schachtkrafthaus (Bild 4) angesetzt. Die Unterschiede der Wirkungsgrade der verschiedenen Lösungen wurden nicht bewertet.

Bild 5 zeigt den Längenschnitt durch den Krafthauschacht mit den Untergrundverhältnissen. Die Felsoberfläche fällt

ziemlich steil bis tief unter die Talsohle und ist an den Hängen zum Teil mächtig überschüttet. Die gewählte Stelle erwies sich mit Abstand als die günstigste.

Es konnte nur der untere Teil in den Fels gelegt werden, während der obere Teil in Lockermassen steht. Diese sind zum Teil stark durchlässig. Es erwies sich als zweckmässig, die Überlagerung mit einer Schlitzwand zu durchfahren. Diese ist 80 cm stark und vermag den gesamten Wasser- und Erd- druck als Kreisring aufzunehmen. Die Masshaltigkeit, die aus statischen Gründen erforderlich war, stellte im Verein mit grobem Blockwerk, zäher Moräne und wasserwegigen Gängen an die Ausführung grosse Anforderungen. Der obere Felskranz, der die Schlitzwand trägt, wurde durch 73 Stück 10 bis 13 m lange und auf 100 Mp vorgespannte BBRV-Anker gesichert. Zusätzlich erwies es sich als erforderlich, den über dem Tiefpunkt der Schlitzwand liegenden Felsteil mit 30 cm Spritzbeton auszukleiden und so den auskragenden Schlitzwandteil zu einem statisch voll wirksamen Zylinder- teil zu ergänzen.

Die darunterliegende Schachtlaibung ist mit 5 bis 7 m langen Perfoankern, die auf 20 Mp vorgespannt und im Abstand von 2,30, 2,30 m angeordnet sind, sowie mit 10 bis 15 cm Spritzbeton gesichert. Die Dichtung gegen Bergwasser

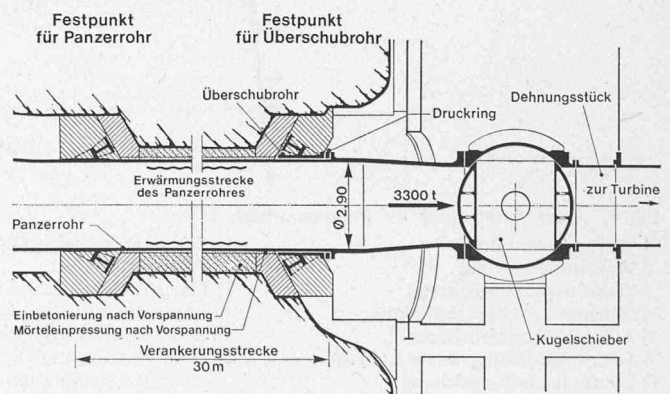


Bild 6. Schematische Darstellung der Verankerungsstrecke und Kugelschieber, 1:250

besteht im Felsbereich aus einem 5 mm starken Stahlblech, das innerhalb des Auskleidungsbetons liegt. Es ist beidseitig mit Schubdübeln versehen. Für diese etwas aufwendige Lösung wurde im Hinblick auf den rauen Baubetrieb entschieden.

Der Hochbau wurde als Stahlskelettbau mit Welleternitverkleidung ausgeführt. Er ist erstellt worden noch während die Aushubarbeiten im Gange waren. Für die Förderung des Ausbruches, ebenso für alle Beton- und Materialtransporte, war ein Turmdrehkran mit 180 Mpm Tragmoment eingesetzt. Sein Ausleger lag so tief, dass er unter das Hallendach einzufahren vermochte. Für den Personentransport war ein Alimak-Aufzug eingesetzt.

Der Kugelschieber ist über ein kurzes überdimensioniertes Konusrohr an die Druckschachtpanzerung angeschlossen. Um einen möglichst starren Festpunkt zu schaffen, wurde die an das Krafthaus anschließende Panzerung (rund 25 m) in Achsrichtung vorgespannt (Bild 6). An der Bergseite ist diese «Verankerungsstrecke» starr, an der Krafthausseite war sie vorerst beweglich verankert. Für das Vorspannen wurde die Panzerung der Verankerungsstrecke auf etwa 150 °C erwärmt und

dann die Längsdehnung durch einen eingelegten Druckring festgehalten.

Der Kugelschieber ruht in Achsrichtung beweglich auf einem Pfeiler. Dieses Auflager ist ebenso wie die Dehnflanschverbindung zwischen Ausbaurohr und Pumpsturbinenspirale justierbar, so dass bei allfälligen geringen Relativverschiebungen des Baukörpers Zwangskräfte ausgeschaltet werden können. Die maximale resultierende Kraft auf Konusrohr und Kugelschieber beträgt bei Schliessen im Turbinenbetrieb 3240 Mp in Richtung Krafthaus, beim Anfahren in den Pumpbetrieb 1000 Mp in Richtung Berg. Das Ausbaurohr ist mit dem Spiralenflansch durch einen Dehnflansch verbunden, der die einwandfreie Trennung der auf den Kugelschieberfestpunkt einerseits und auf das Fundament der Pumpsturbinenspirale andererseits wirkenden Kräfte gewährleistet.

Nach längerem Studium wurde dafür entschieden, die Spirale drucklos satt einzubetonieren. Im Umhüllungsbeton müssen hiebei, den Dehnungen der Spirale entsprechend, Risse auftreten. Es wurde angestrebt, die Rissweiten durch eine Bewehrung, die ihrerseits am Stützschafelring befestigt ist,

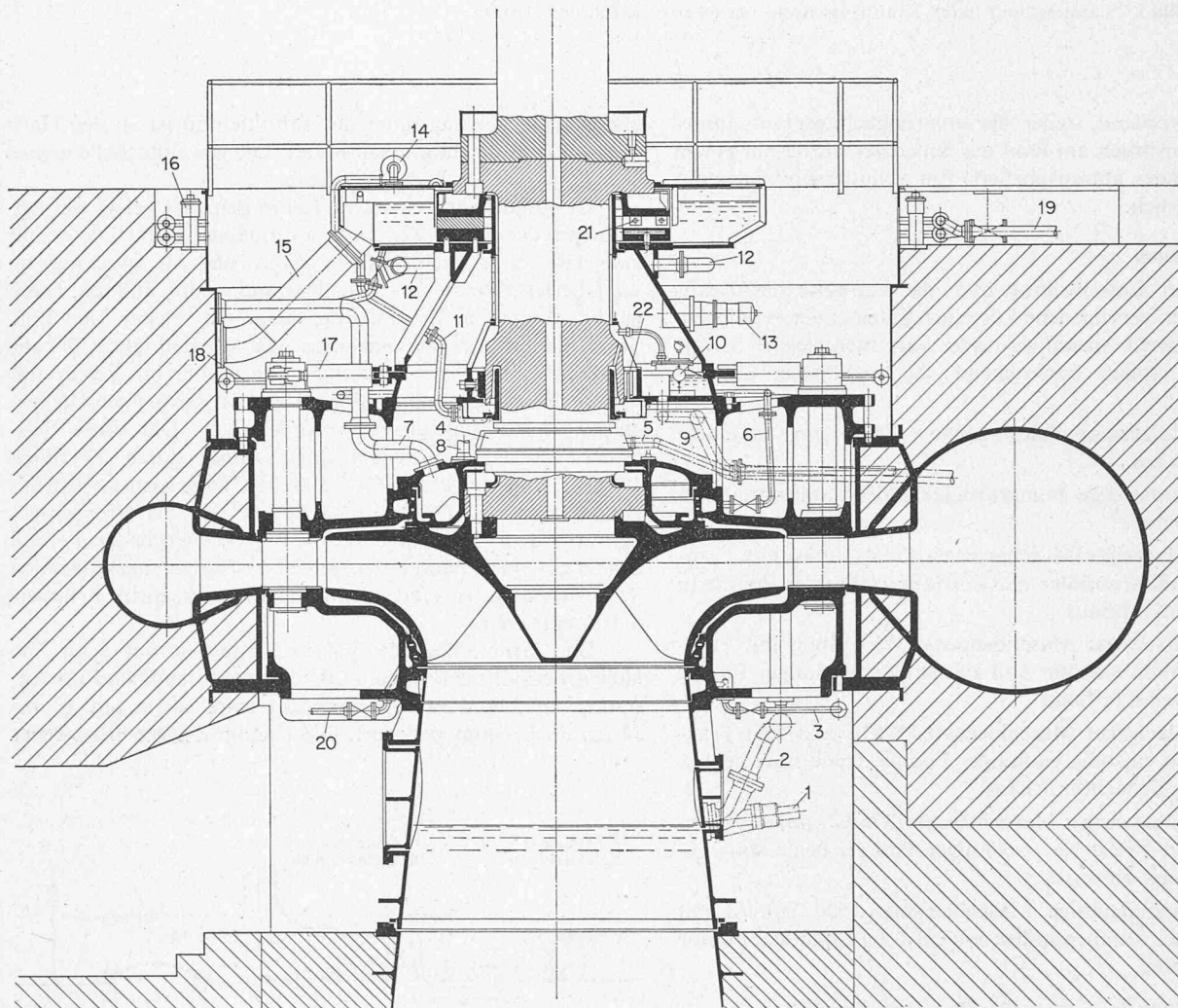


Bild 7. Querschnitt durch die Pumpenturbine, 1:70

- | | | |
|--|--|--|
| 1 Warmwasserventil | 10 Schwimmerschalter Ölstand Führungslager | 16 Tauchspulventil (und Schnellschlusskolben) |
| 2 Warmwasserleitung | 11 Lagerölaufleitung Führungslager | 17 Leitradservomotor |
| 3 Stabilisierungsluftleitung | 12 Lagerölaufleitung Spurlager | 18 Sickerölaufleitung |
| 4 Gehäuse der Gleitringdichtung | 13 Spurlageranhebepumpe | 19 Steuerölauf- und -rücklauf für Tauchspulventile |
| 5 Ablauf Gleitringdichtung | 14 Öldunstabsaugung von Spurlager-Ölwanne | 20 Spaltwasserleitung unteres Labyrinth |
| 6 Spaltwasserleitung oberes Labyrinth | 15 Lageröldrucklauf Spurlager | 21 Schrauben der Lauftringteilung |
| 7 Lauftradlastungsleitung | | 22 Ölspritzrohre zwischen den Halslagersegmenten |
| 8 Blasluftleitung | | |
| 9 Lagerölrücklaufleitung Führungslager | | |

klein zu halten. Diese Risse werden zugunsten einer möglichst guten Bettung und einer unmittelbaren Krafteinleitung in den Fels toleriert. Die Auflagerkräfte des Motorgenerators werden über die Geschossdecke ebenfalls in den Fels geleitet.

5. Das Unterbecken

Das neue Unterbecken ist eine Vergrößerung des bestehenden Beckens. Soweit es sich nicht an den Berghang lehnt, wird es durch einen Damm bescheidener Höhe begrenzt. Der Aushub konnte für die Dammschüttung oder als Zuschlagstoff verwendet werden. Auf eine unbedingt sicher wirkende Abdichtung des Beckens wurde verzichtet. Die Böschungen sind durch eine 1m starke Murschuttauflage, die ihrerseits mit Grobschotter abgedeckt ist, gedichtet. In der Sohle wurde auf den anstehenden Kiesboden ebenfalls eine Murschutt- bzw. Schluffschicht aufgebracht und eingewalzt. Zu diesem Vorgehen war der Bauherr ermutigt, da sich im bestehenden, ebenfalls nicht abgedichteten Becken schon nach wenigen Jahren durch den Gletscherschweb und durch Schluffablagerung eine zureichende Selbstdichtung ergab.

Das Auslaufbauwerk bzw. Einlaufbauwerk für den Pumpbetrieb liegt, ähnlich wie in Latschau, am Ende eines rinnenartigen Zulaufes. Um die Unterwasserführung in den Fels legen zu können, musste das Auslaufbauwerk an den Berghang gerückt werden. Hieraus ergab sich die Achsführung des Unterwasserschachtes gemäss Bild 4.

Da vom Maschinenlieferanten Bedenken wegen des Entstehens unerwünschter Drallströmungen im Pumpbetrieb bestanden, wurde ein hydraulischer Modellversuch durchgeführt. Es ergab sich, dass in den beiden in verschiedenen Ebenen liegenden Krümmern keine Drallströmungen erzeugt werden und dass ein günstiges Geschwindigkeitsprofil vorliegt. Selbst kleine Drehbewegungen vor dem Einlauf laufen als Drallströmungen durch, sind aber nach der Beschleunigungsstrecke des Saugkrümmers nicht mehr feststellbar.

6. Die Pumpturbine

Die mit 375 U/min laufende Pumpturbine (Bild 7) wurde für den Vollastdurchfluss von $85 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer mittleren Nettofallhöhe von 337 m WS bemessen, die Turbinenleistung beträgt dabei 256 MW. Die maximale Leistung der Pumpturbine wurde für den Turbinenbetrieb mit 284 MW begrenzt. Im Pumpbetrieb beträgt der Förderstrom $67 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einer mitt-

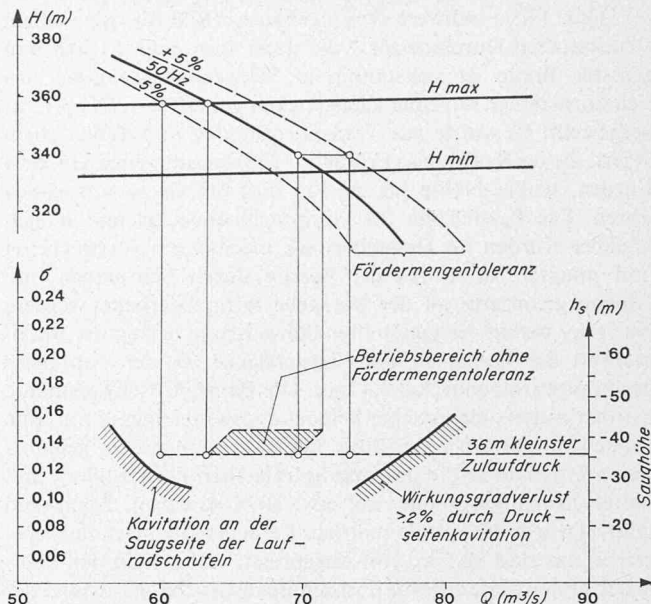


Bild 8. Ergebnisse der Kavitationsversuche

leren manometrischen Förderhöhe von 346 m WS, die Antriebsleistung 246 MW.

Die spezifische Drehzahl wurde mit $n_s = 140$ ($n_g = 38,3$) für den Pumpbetrieb gewählt. In Bild 8 sind die Kavitationszahlen der Anlage für den Betriebsbereich im Pumpbetrieb eingetragen, ausserdem die aus den durchgeführten Modellversuchen ermittelten Kurven der Kavitationszahlen, die für das Kavitationsverhalten im Pumpbetrieb charakteristisch sind. Es ist daraus zu erkennen, dass bei der gewählten Mindestzulaufhöhe von 36 m WS bezogen auf Spiralenmitte auch bei Inanspruchnahme einer Förderstromtoleranz von $\pm 5\%$ mit einem völlig kavitationsfreien Betrieb auf der Saug- und Druckseite der Laufschaufeln gerechnet werden kann.

Der maximale Druckstoss wurde für die Abschaltung aus dem Turbinenbetrieb mit 33% berechnet, das ergibt einen Druck von 52 kp/cm^2 für Turbine und Kugelschieber. Der Druck beim Pumpen gegen den geschlossenen Kugelschieber beträgt 55 kp/cm^2 .

Bild 9. Bearbeitung des Spiralgehäuses auf der Baustelle nach dem Schweißen

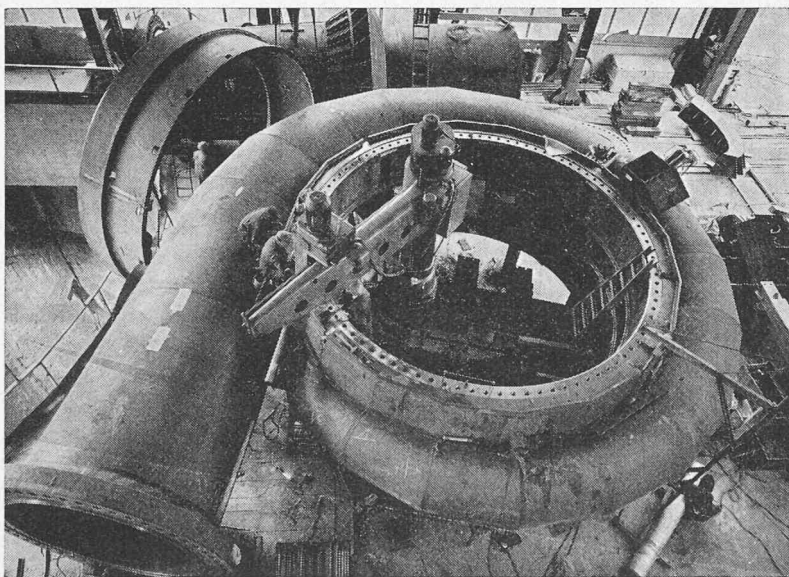
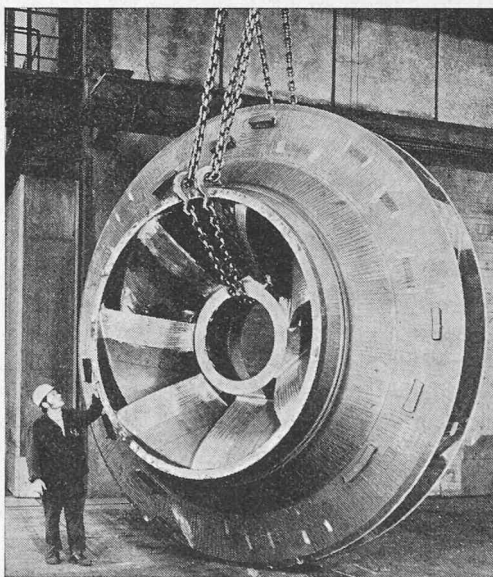


Bild 10. Das Laufrad mit 4350 mm Durchmesser



Das 170 t schwere Spiralgehäuse (Bild 9) mit einem Druckstutzen-Durchmesser von 2550 mm und 11500 mm grösster Breite ist vollständig in Schweisskonstruktion aus Feinkornstählen mit einer Zugfestigkeit von 55 bzw. 58 kp/mm² hergestellt. Es wurde aus Transportgründen in 5 Teilen angeliefert, die im Krafthaus (Frühjahr 1973) zusammengesweisst wurden, wobei Nähte bis zu 135 mm Stärke zu schweissen waren. Die Passflächen für Pumpturbinendeckel und Kugelschieber wurden im Herstellerwerk mechanisch vorbearbeitet und mussten, soweit es der Verzug durch Schweissen und Glühen erforderte, an der Baustelle fertig bearbeitet werden. Nach der bereits fertiggestellten Schweissung betrug der Maximalwert der Welligkeit der Flanschfläche für den Anschluss der Pumpturbinendeckel 0,4 mm. Die Baustellenschweissnähte wurden mittels elektrischer Widerstandsheizelemente auf eine Breite von 800 mm bei 550 bis 580 °C spannungsarm geglüht; gleichzeitig wurde die gesamte Spirale thermisch isoliert und mittels Propangasbrenner auf etwa 80 °C erwärmt. Nach dem Glühen wurde die Spirale mit dem 1,5fachen höchsten Betriebsdruck, das sind 82,5 kp/cm² abgepresst, wobei man den Prüfdruck stufenweise erhöhte und den Beanspruchungszustand der Konstruktion durch rund 170 Dehnungsmessstreifen überprüfte.

Das Laufrad (Bild 10) aus Chromstahlguss 13.4 mit einem Durchmesser von 4350 mm hat 7 Schaufeln und wiegt fertig bearbeitet 36 t.

Das Traglager mit 2200 mm Aussendurchmesser, das für eine Last von 700 Mp bemessen wurde, stützt sich auf den Pumpturbinendeckel ab, das Segmentführungslager (Wellendurchmesser 1300 mm) befindet sich darunter. Die Anhebe- und Abhebe- und Abstellen- und bei Betriebsübergängen, die mit einer Drehrichtungsumkehr verbunden sind, betätigt. Beide Lager haben eine gemeinsame Druckölmehrschmierung mit aussenliegendem Kühler. Das reichliche Ölvolumen in den Lagerbehältern gewährleistet zusammen mit entsprechenden konstruktiven Massnahmen den Notauslauf ohne Ölmehrschmierung durch die Aussenkühler (Selbstschmierung).

Das Pumpturbinengeschoss erhielt für Ein- und Ausbau der Pumpturbinenteile eine entsprechende Raumhöhe, welche eine Verbindungswelle zwischen den Wellenflanschen der hydraulischen und elektrischen Maschine erforderlich macht. Dies bedingte im weiteren die Anordnung von insgesamt vier Führungslagern. Die erste biegekritische Drehzahl liegt mit 620 U/min ausreichend über der höchsten Durchgangsdrehzahl von 549 U/min. Die torsionskritischen Drehzahlen wurden zu 19, 26 und 110 Hz berechnet.

Zur Wellenabdichtung wird eine axiale Gleitringstopfbüchse verwendet, die sauberes Quellwasser als Sperrflüssigkeit erhält. Der Sperrwasserbedarf wurde mit etwa 2 l/s geschätzt. Das Auswechseln der Dichtringe ist bei gefüllter, jedoch stillstehender Pumpturbine nach hydraulischem Anpressen der sogenannten Stillstandsichtung möglich.

Der untere Pumpturbinendeckel und der obere Saugrohrkonus sind nicht einbetoniert, um einen Zugang zu den unteren Leitschaufellagern (Teflonbüchsen) zu ermöglichen.

Sämtliche Pumpturbinenteile, die bei einer Überholung auszubauen sind, können mittels hydraulischer Hubeinrichtungen nach oben durch das Pumpturbinengeschoss in den Kugelschieberschacht und damit in den Bereich des Hauptkranes gebracht werden. Es ist somit die Demontage der Pumpturbine ohne Ausbau der Synchronmaschine möglich.

Mit Rücksicht auf die Anforderungen des Netzes wurden möglichst kurze Zeiten für Anfahr- und Betriebsübergänge angestrebt. Die in Tabelle 3 angeführten Zeiten gelten ab Befehlsgabe.

Das Laufrad der Pumpturbine wird in Luft zum Pump-

betrieb hochgefahren, die Pumpturbinenspirale bleibt dabei wassergefüllt.

Die Regulierung besteht aus einem elektrohydraulischen Regler mit Einzelschaufelsteuerung. Jede der 20 Leitschaufeln wird von einem eigenen, druckölbetätigten Servomotor angetrieben; jedem Servomotor ist eine sogenannte «Tauchspule» zugeordnet, welche jeweils ein hydraulisches Steuerventil betätigt und auf diese Weise die elektrischen Impulse des Reglers umsetzt. Die Stellung der Leitschaufeln wird auf elektrischem Wege zum Regler rückgeführt. Sämtliche Steuerventile sind an eine Notschluss-Druckölleitung angeschlossen, so dass bei Störungen im elektrotechnischen Teil des Reglers das Schliessen der Leitschaufeln hydraulisch-mechanisch eingeleitet werden kann.

Die Pumpturbine muss im Bereich zwischen Viertel- und Vollast uneingeschränkt betrieben werden können. Hiefür wurde vorsorglich eine Belüftung des Saugrohres durch zwei Kompressoren vorgesehen, die zusammen 3400 Nm³/h liefern können.

7. Absperrorgane

Die beiden Gehäusehälften und der Drehkörper des längsgeteilten Kugelschiebers von 2550 mm lichtigem Durchmesser bestehen aus Feinkornstahlguss und wiegen zusammen 160 Mp. Für den Antrieb ist auf jeder Seite ein Ringkolbenservomotor kraftschlüssig mit dem Gehäuse verbunden. Auf der Bergseite erhält der Schieber einen Revisionsabschluss, dessen Dichtring durch Wasserdruck angepresst und mit Schraubenspindeln mechanisch fixiert wird. Turbinenseitig befindet sich der ebenfalls durch Druckwasser betätigte Dichtungsring der Betriebsdichtung. Zum Öffnen und Schliessen des Schiebers dient Druckwasser aus der Falleitung; es besteht eine Vorsteuerung durch Drucköl. Der Antrieb ist so bemessen, dass der Kugelschieber bei einem Leck im Bereich der Pumpturbine von 1 m² Grösse, bei welchem etwa die doppelte Betriebswassermenge ausströmt, sicher schliesst, auch wenn nur einer der beiden Servomotoren wirksam ist. Die Fülleitung hat einen lichten Durchmesser von 350 mm.

An der Einmündung des Unterwasserschachtes in das Unterwasserbecken ist eine Rollschütze angeordnet, welche die Aufgabe hat, bei Laufradrevisionen eine Entleerung des Unterwasserschachtes zu ermöglichen und ausserdem bei einem Bruch eines wasserführenden Pumpturbinenteiles als Sicherheitsorgan zu wirken. Um zu verhindern, dass die Schütze bei einem Bruch der Kolbenstange unbeabsichtigt schliesst, ist die Schützentafel durch einen starken Bolzen in Offenstellung gesichert. Die Schütze wird durch Drucköl angetrieben und durch eine Leckölsteuerung oberhalb des Sicherheitsbolzens schwebend gehalten. Bei einem Notschluss wird die Schliessbewegung dadurch freigegeben, dass zuerst der Sicherheitsbolzen mittels Drucköl aus dem Schützenservomotor gezogen wird.

8. Der Motorgenerator

Die Bauplanung des Kraftwerkschachtes verlangte es, sehr frühzeitig grundsätzliche Konzepte für die elektromaschinellen Nebenanlagen zu entwickeln und baubestimmende Einzelheiten noch vor der Maschinenvergabe festzulegen. Die Vorarlberger Illwerke mussten Entscheidungen treffen, ohne die zukünftigen Anbieter bzw. Auftragnehmer der Elektroindustrie zu kennen. In einem fortgeschrittenen Planungsstadium wurde zur endgültigen Festlegung der Kuppelungs- und Einbaumasse des Motorgenerators ein Planungsauftrag vergeben. Die Ergebnisse konnten der 1971 erfolgten Ausschreibung auf den Motorgenerator zugrunde gelegt werden. Anfang 1972 sind der Motorgenerator und der Anwurfmotor und Mitte 1972 der Maschinentransformator bestellt

worden. Der Motorgenerator ist in den Werkstätten des Auftragnehmers weitgehend angearbeitet, jedoch im Hinblick auf die Profilbeschränkungen des Eisenbahntransportes ist der Ständer und der Rotor in der Montagehalle des Rodundwerkes II zusammengebaut worden (Ständergehäuse geschweisst, geblecht und mit Wicklung versehen; Rotorblechekette geschichtet und Pole samt Wicklung aufgebracht). Ein 300-t-Kran stand ab April 1973 für Montagearbeiten im Kraftwerksschacht und in der Montagehalle zur Verfügung. Anfang 1973 folgte der Auftrag auf die Maschinenableitung, den 21-kV-Lastschalter und auf die Bremstrennschalter.

Entsprechend der in den vorhergehenden Abschnitten dargelegten Betriebsweise des Maschinensatzes mussten die Bemessungskriterien für den Motorgenerator und die Anfahr-einrichtung untersucht werden. Allgemein interessierende Untersuchungsergebnisse, welche zu Ausführungsentscheidungen geführt haben, werden im folgenden beschrieben.

In Abhängigkeit vom Schaltzustand und von der Belastung des südwestdeutschen 220/380-kV-Verbundsystems erfolgt ein Motor- oder ein Generatorbetrieb unter Umständen über grössere Übertragungsentfernungen. Die dynamische Stabilität des Vollastbetriebes der gesamten Werkgruppe mit rund 1110 MW über die Umspannanlage Bürs bei Bludenz (Bild 13) beeinflusste die Festlegung der transienten und synchronen Eigenschaften des Motorgenerators. Eine grösste gesättigte Transientreaktanzen von 32% und eine gesättigte Synchronreaktanzen von höchstens 112% war wünschenswert. Die dynamische Stabilität der Werkgruppe ist auch bei weiterem Betrieb der vier bestehenden Exportleitungen mit 220 kV und bei einpoligen Kurzschlüssen (unabhängig vom Kurzschlussort) gewährleistet. Die einwandfreie statische Stabilität des Motorgenerators ist durch seinen Polradwinkel von 28,4° (bei 310-MVA-Generatorleistung) bzw. 38,7° (bei 253-MW-Motorleistung) gekennzeichnet. Die Stabilitätsuntersuchungen haben ergeben, dass die von der Umspannanlage Bürs abgehenden Exportleitungen wegen der Zuwachsleistung des Rodundwerkes II noch nicht auf 380 kV umgestellt werden müssen.

Dem statischen Erregersystem des Motorgenerators und seiner Spannungsregulierung kann ebenfalls eine stabilitäts-erhöhende Wirkung zugesprochen werden. Der Spannungsregler bringt positive und negative Spannungsschüsse über die Thyristorbrücken auf die Polradwicklung. Bei einer Nenn-erregerspannung von 294 V beträgt die Deckenspannung bei Stösserregung 620 V. Das betriebsmässige Aberregen erfolgt im Wechselrichterbetrieb der Thyristorbrücken, während bei Abschaltungen des Maschinensatzes eine Schnellentregung über einen spannungsabhängigen Widerstand im Erregerkreis in rund 3 s vom Leerlauf mit Nennspannung 21 kV auf 10% Ständerrestspannung entregt wird. Bei einer Lastabschaltung wird die halbe Ständerspannung in 1,2 s erreicht.

Das statische Erregersystem wird von einer dritten Wicklung des Maschinentransformators angespeist. Im normalen Betrieb ist der Maschinentransformator dauernd an die 220-kV-Sammelschiene der Umspannanlage Bürs (und damit an das 220-kV-Netz) angeschlossen. Der Motorgenerator wird von einem besonderen 21-kV-Lastschalter synchronisiert und abgeschaltet; er wird im Abschnitt 11 näher beschrieben. Für einen aushilfsweisen Versuchsbetrieb kann die Erregerleistung des Motorgenerators auch über eine 20-kV-Verbindung vom bestehenden Rodundwerk I angespeist werden.

Bei Nennleistungserregung kann der Motorgenerator eine maximale Magnetisierungsleistung (bei Leistungsfaktor 0 übererregt) von 252 MVar abgeben, die Aufnahme der Magnetisierungsleistung beträgt 235 MVar bei 10% Leerlaufferregung. Die Maschine ist für einen Leistungsfaktorbereich von 0,84 unter- und übererregt im Generatorbetrieb mit 260,4 MW (abgegebener Wirkleistung) und im Motorbetrieb von 253 MW

Tabelle 3. Zeitbedarf für Betriebsumstellungen in Sekunden

<i>Hauptzeiten</i>	
Stillstand bis Turbinenvollast	80
Stillstand bis volle Pumpförderung	155
Übergang von Pumpvlast bis Turbinenvollast	225
Übergang von Turbinenvollast bis Pumpvlast	345
<i>Einzelzeiten</i>	
Auslauf aus dem Turbinenbetrieb von Nenndrehzahl bis 58% davon	40
Elektrisches Bremsen von 58% Drehzahl bis Stillstand	70
Hochfahrzeit der belüfteten Pumpturbine von Stillstand bis Nenndrehzahl	70
Füllen der Pumpturbine mit Luft	20
Füllen der belüfteten Pumpturbine mit Wasser	36
Öffnungs- und Schliesszeit Pumpturbine	20
Kugelschieber	20

(aufgenommener Wirkleistung) bemessen. Diese Dauervollast kann im gesamten Spannungsbereich von 21 kV $\pm 8\%$ (also von 19320 bis 22680 V) auftreten.

Besondere Bedeutung für die Dimensionierung des Motorgenerators kam der Auswahl des Schwungmomentes zu (GD^2). Dadurch, dass für die Begrenzung der Beanspruchungen der Triebwasserführung durch Druckstösse bei Abschaltung und Regulierung der Pumpturbine ein Schwungmoment von 3800 Mpm² als zureichend erkannt wurde, ergab sich für die 16polige Synchronmaschine ein konstruktiv bedingtes, relativ kleines Rotorgewicht. Dieses kleine Schwungmoment als Dimensionierungskriterium veranlasste den genauen Vergleich der konventionellen Luftrückkühlung mit der direkten Leiterkühlung in der Ständerwicklung und in der Rotorwicklung. Die direkte Leiterkühlung gestattet die kleinere Dimensionierung der Synchronmaschine, so dass zu untersuchen war, ob die konstruktive Auslegung bei direkter Leiterkühlung dem Mindestschwungmoment besser entspricht als die konstruktive Auslegung für eine Maschinenvariante mit konventioneller Luftrückkühlung. Der genaue Vergleich der beiden Kühlungsvarianten bezog sich daher auf das gleiche Mindestschwungmoment von 3800 Mpm² und auf die gleichen Stabilitätsdaten. Die wassergekühlte Synchronmaschine erwies sich gegenüber der konventionellen Luftrückkühlung wesentlich kürzer, und es konnten 120 t aktiver Materialien eingespart werden, was die wassergekühlte Variante auch kostenmässig günstig beeinflusst hat.

Gegenüber der luftgekühlten Variante kann mit der Wasserkühlung in der Ständer- und Rotorwicklung eine wesentlich niedrigere Wicklungstemperatur erzielt werden. Die Temperaturverteilung über alle Wicklungsbereiche wird vergleichmässig, so dass gegenüber der konventionellen Luftrückkühlung Hot-Spot-Stellen weitgehend vermieden werden. Die thermischen und mechanischen Beanspruchungen in den Wicklungsisolierungen zufolge rascher Änderung des Betriebszustandes vermindern sich. Das Kühlwasser führt aus dem Leitungskupfer die Joulesche Wärme 50mal besser ab als ein gasförmiges Medium mit 80facher Strömungsgeschwindigkeit. Die mittlere Wassergeschwindigkeit in den Kupferhohlleitern beträgt 2 m/s. Mit dem Auftragnehmer des Motorgenerators wurden Wicklungstemperaturen vereinbart, welche weit unter den durch Vorschriften zugelassenen liegen: Bei Nennbetrieb mit 310 MVA, Leistungsfaktor 0,84 und 21 kV beträgt die mittlere Ständerwicklungs-Kupfertemperatur etwa 49 °C. Zuzufolge dieser niedrigen Temperatur werden auch die Kupferverluste kleiner, und dementsprechend steigt der Wirkungsgrad. Die Eisenverluste werden im Bereich der Ständerwicklungen ebenfalls vom Kühlwasser der direkten Leiterkühlung abgeführt. Im Ständerjoch ist eine Fremdbelüftung vorgesehen,

welche über normale Luft/Wasser-Wärmetauscher die restlichen Eisenverluste abführt. Eine Anzahl separat montierter Ventilatoren treibt die Kühlluft durch den Ständer und durch am Ständerumfang angebrachte Luft/Wasser-Kühler. Die konstruktiven Einzelheiten für direkte Wasserkühlung des Eisenpaketes wären bei diesem Maschinentyp aufwendiger ausgefallen.

Die hohe Überlastungsfähigkeit der Synchronmaschine mit direkter Leiterkühlung wird nicht so sehr im Generatorbetrieb des Rodundwerkes II ausgenutzt als vielmehr im Motorbetrieb in den Fällen einer Frequenzsteigerung. Wenn bei höheren Netzfrequenzen gleichzeitig eine grössere Magnetisierungsleistung vom Pumpenantriebsmotor aufgenommen wird, dann wird die höhere Überlastungsfähigkeit der Maschine mit direkter Leiterkühlung gegenüber der Luftrückkühlung zu einem betrieblichen Vorteil, welcher ohne Verkürzung der Lebensdauer ausgenutzt werden darf. Ferner kann aus Stabilitätsgründen die Erregung im Motorbetrieb auch über den Nennleistungsfaktor hinaus vergrössert werden, ohne dass die dabei auftretende Temperaturerhöhung nachteilige Folgen hätte. Die Maschine mit grösserer thermischer Reserve kann den vom Verbundsystem benötigten Ausgleich auch während längerer Zeitdauer einer Netzstörung betriebssicher bieten.

Ein weiterer Vorteil der Wasserkühlung in der Ständerwicklung und in der Rotorwicklung liegt in dem günstigeren Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Belastung. Die Maschine mit direkter Leiterkühlung weist einen höheren Teillastwirkungsgrad auf als die Maschine mit konventioneller Luftrückkühlung. Im Spitzenbetrieb kommt dem jahresmittleren Teillastbereich erhöhte Bedeutung zu. Die Teillastverluste werden infolge besonders kleiner Lufttreibungsverluste des Polrades gering. Der Motorlüfter der konventionellen Schenkelpolmaschine entfällt, und die Polücken werden zur weiteren Herabsetzung der Lufttreibungsverluste abgedeckt. Beim Motorgenerator für Rodundwerk II ist die Polücke besonders klein, weil der Polkern trapezförmig ausgebildet wird – um die Tangentialkomponente der Fliehkraft auf die Polwicklung zu vermeiden. Bei dieser Synchronmaschine erfolgt erstmals die Anwendung der Wasserkühlung der Polwicklung bei einer Trapezpolausführung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die technischen und wirtschaftlichen Vorteile der direkten Leiterkühlung bei Schenkelpolmaschinen mit zunehmender Leistung steigen, jedoch bei einem relativ kleinen Schwungmomentfordernis besonders gut ausgenutzt werden können.

9. Der Anfahrmotor

Es dürfte nicht sinnvoll sein, einer der möglichen Anfahrmethoden von vornherein den Vorzug zu geben. Ausgedehnte Studien und Vergleichsbetrachtungen wurden notwendig, um die für die vorliegenden Verhältnisse günstigste Art des Inbetriebnehmens der Pumpenturbine in Pumpendrehrichtung zu ermitteln. Es zeigte sich bereits in der Planungszeit, dass die Art des Anlaufes die Kosten des Gesamtprojektes beeinflusst. Allerdings war die Vergleichsbetrachtung nicht nur auf die Anfahrmethode selbst zu beschränken, sondern auch auf die konstruktive Ausbildung des Motorgenerators, auf die gesamte Anfahrerschaltung, die Versorgung des Eigenbedarfes und auf schaltanlagentechnische Unterschiede der Anfahrmethoden auszudehnen; ebenso mussten die Bereitstellung der Anfahrleistung und der Einfluss auf das Verbundnetz geprüft werden. Die Sicherstellung des betriebswichtigen Eigenbedarfes beeinflusste in weiterer Folge auch die Ausbildung des Maschinentransformators, und die schaltanlagentechnischen Unterschiede erstreckten sich nicht nur auf die Anordnung des 220-kV-Leistungsschalters oder des 21-kV-Lastschalters,

sondern auch auf das Gebiet der Schutzeinrichtungen und auf die Automatikschaltung des Maschinensatzes. Bei möglichst gleicher Betriebssicherheit der maschinellen Einrichtungen sowie der betriebsnotwendigen Hilfs- und Nebenanlagen des Maschinensatzes erstreckte sich die Untersuchung auf drei verschiedene Methoden des Anfahrens in den Pumpbetrieb (Bild 14):

a) Hydraulisches Anfahren mit einer Anwurfmaschine, welche beim Abstellen aus dem Turbinenbetrieb auch als Bremsmaschine dienen sollte. Die Erregung des Motorgenerators und der übrige betriebswichtige Eigenbedarf werden in dieser Variante von einem entsprechend bemessenen Hausmaschinensatz bezogen. Es entsteht die einfachste Ausbildung der 21-kV-Schienenverbindung zwischen Motorgenerator und Blocktransformator (ohne Abzweig und ohne Unterbrechung durch Schaltorgane). Die Drehrichtungsumkehr besorgt ein fünfpoliger 220-kV-Trennschalter.

b) Elektrisches Anfahren über einen asynchronen Selbstanlauf des Motorgenerators mit Hilfe besonders ausgestalteter Polkörper über einen Anfahrtransformator. Dieser Anfahrtransformator setzt den Einschalt-Stromstoss und damit den Spannungsabfall im anspeisenden 220-kV-Netz herab. Er wird an einen eigenen Abzweig zwischen Motorgenerator und Maschinentransformator angeschlossen, an den ferner ein Eigenbedarfstransformator für die Erregerleistung und den betriebswichtigen Eigenbedarf geschaltet wird. Ferner muss in die Maschinenableitung ein 21-kV-Lastschalter eingebaut werden, der nach erfolgtem Hochlauf den Motorgenerator mit dem Netz synchronisiert. Im Sekundärkreis des Anfahrtransformators waren zusätzliche Schaltorgane zu berücksichtigen und das gesamte 21-kV-System durch eine elektrische Bremsvorrichtung zu ergänzen.

c) Elektrisches Anfahren in den Pumpbetrieb mit Hilfe eines am Wellenende aufgebauten Schleifringläufer-Asynchronmotors. Dieser Anwurfmotor wird von einer dritten Wicklung (8 kV) des Maschinentransformators angespeist, von welcher auch die Erregung des Motorgenerators sowie der betriebswichtige Eigenbedarf bezogen werden. In der 21-kV-Verbindung zwischen Motorgenerator und Maschinentransformator ist kein Abzweig vorzusehen, sondern nur ein Lastschalter für das Synchronisieren und Abstellen des Maschinensatzes. So wie in Variante b) ist auch in der Variante c) dieser Lastschalter 5polig auszubilden, um mit Hilfe der Vorwahl der Schalterpole die Drehrichtung der Synchronmaschine dem Turbinen- oder dem Pumpbetrieb anzupassen. Auch in dieser Variante ist eine elektrische Bremsvorrichtung vorzusehen.

Als Ergebnis der Vergleichsuntersuchungen ergaben sich eine Reihe technischer und wirtschaftlicher Vorteile zugunsten der Anfahrmethode c) mit elektrischem Anwurfmotor. Der Anwurfmotor konnte für ein hohes Beschleunigungsmoment ausgebildet werden, welches er im Gegensatz zur Anwurfmaschine bis fast zur synchronen Drehzahl beibehält. Seine Ausbildung als Schleifringläufer mit einem Flüssigkeitsanlasser gestattet die Beschränkung des Anlaufstromes auf etwa den Nennstrom des Anwurfmotors, womit der Spannungsabfall (rückwirkend auf das 220-kV-Netz) unbedeutend wird. Die beim Selbstanlauf an der Polradoberfläche auftretenden Wirkverluste bei Methode b) ergeben in den massiven Polschuhen erhebliche Oberflächentemperaturen. Eine kurze Aufeinanderfolge mehrerer Anläufe wird problematisch. Im Falle c) (Anwurfmotor) werden die Läuferkreisverluste auf den Flüssigkeitsanlasser und den Läuferkreis der Asynchronmaschine aufgeteilt.

Im übrigen lässt sich der elektrische Anwurfmotor für 70 s Anlaufdauer thermisch günstig dimensionieren. Demgegenüber müsste eine Anwurfmaschine unabhängig von der Kurzzeitbelastung für die Anfahrleistung bemessen werden,

Tabelle 4. Daten der untersuchten Anlaufmethoden

Vergleichskriterien	a) Anwurf turbine	b) Selbstanlauf	c) Anwurf motor
Dauer des Hochlaufes vom Stillstand bis Pumpen-Nenn Drehzahl in s	70	110	70
Dauer des Anfahrens vom Stillstand bis Pumpenvollast in s	170	205	170
Übergang von Turbinenvollast auf Pumpenvollast in s	195	270	235
Netzbelastung durch Anlauf mit MVA und $\cos \varphi$	0	125 und 0,08	35 und 0,8
Spannungsabfall an der 220-kV-Sammelschiene der Umspannanlage Bürs in %	0	mind. 3,0	höchstens 1,0
Polradausbildung des Motorgenerators	starker Dämpferkäfig (keine Anfahrwärme)	kein Dämpferkäfig (grosse Anfahrwärme)	starker Dämpferkäfig (keine Anfahrwärme)
Maschinenschalter	Umspannanlage Bürs 220 kV	Rodundwerk II	Rodundwerk II
Einbauort/Spannung		21 kV und 5 kV	21 kV
Eigenbedarfsversorgung durch	Eigenbedarfsmaschinensatz	Hochstromabzweig 21 kV	Anschluss an Maschinentrafo dritte Wicklung 8 kV
Abbremsen des Maschinensatzes	hydraulisch (möglichst mit Anwurf turbine bzw. mit Pump turbine)	elektrisch (Kurzschlussstrombremsung im Ständer des Motorgenerators)	elektrisch (Kurzschlussstrombremsung im Ständer des Motorgenerators)
Kostenvolumen in %	100	103	96

kann aber dafür beliebig oft hintereinander in den Pumpbetrieb hochfahren. Im Normalbetrieb des Maschinensatzes weist das Rad der Anfahr turbine etwas grössere Leerlaufverluste auf als der Rotor des Anfahr motors. Die Anordnung der Anfahr turbine oberhalb des Motorgenerators erschwert die Ausbildung des Wasserzuführungskopfes der direkten Leiterkühlung und verschlechtert ausserdem die Zugänglichkeit, weil die elektrische Maschine gegen allfällige Wasseraustritte im Bereich der Anfahr turbine zusätzlich abgeschirmt werden müsste.

Zusammenfassend sei auf Tabelle 4 hingewiesen:

Die Bemessung der Synchronmaschine für relativ kleines Schwungmoment hätte die Polausbildung für Selbstanlauf (Methode b) erschwert; eine Verlängerung der Hochlaufzeitdauer wäre wahrscheinlich notwendig geworden. Zum Kostenvergleich wird bemerkt, dass die vertikale Anordnung des Maschinensatzes im vielgeschossigen Kraftwerkschacht für die Anfahr methode c), also für die Unterbringung des Anwurf motors, keine zusätzlichen baulichen Aufwendungen und für die Nebenanlagen die geringsten Bauaufwendungen von allen drei Methoden aufwies.

10. Der Maschinentransformator

Der im Freien aufgestellte Maschinentransformator erhielt ein Übersetzungsverhältnis von 21 auf 240 kV in Schaltgruppe Yd 5. Er ist für eine Durchgangsleistung von 310 MVA bemessen. Alle Wicklungen bestehen aus Drill-Leiter mit gemeinsamer Papierisolation. Die Hochvoltwicklung hat leitungsseitig eine volle Nennisolation 220 und ist zum starr geerdeten Sternpunkt hin abgestuft auf die Nennisolation 110. Die Stossspannungsfestigkeit mit Vollwellenprüfung (1,2/50 μ s) beträgt 1050 kV_{sw}. Die Niedervoltwicklung erhielt eine Nennisolation 30 und eine Wicklungsfestigkeit entsprechend einer 50-Hz-Prüfung durch 1 min mit 70 kV; Stossspannungsfestigkeit 170 kV_{sw}. Die einfachkonzentrische Wicklungsanordnung brachte die erwünschte niedrige Kurzschlussleistung von 10%. Im Hinblick auf den Gleisanschluss des Kraftwerkes war der Transformator so zu konstruieren, dass er mit geringen Demontagen bahntransportfähig wurde. Er ist mit einem Fünfschenkelkern ausgestattet, welcher aus kaltgewalzten Blechen

besteht. Schenkel- und Jochbleche werden mit Kunststoffbandagen zusammengehalten und durch mehrere Schlitz parallel zur Schichtebene ölgekühlt.

In einer an den Aufstellungsort des Transformators angrenzenden Kammer ist die Kühlanlage, bestehend aus drei gleich grossen Öl/Wasser-Wärmetauschern, angeordnet. Die Kühler sind öl- und wasserseitig parallel geschaltet; in jedem der drei Kühlkreise befindet sich eine eigene Ölpumpe. Zwei Kühlaggregate genügen, um die Vollast-Verlustleistung des Transformators abzuführen, ohne die durch die Vorschriften zugelassenen Temperaturgrenzen zu überschreiten.

Bei Kühlwasser von 12°C tritt eine Wicklungstemperatur bei Vollast von etwa 55°C und eine mittlere Öltemperatur von etwa 42,5°C auf. Das Dehngefäss des Transformators ist zweiteilig und mit einer Gummimembrane versehen, um den Luftzutritt zum Isolieröl zu unterbinden.

Die von normalen Maschinentransformatoren abweichende Lösung besteht in der Anordnung einer dritten Wicklung mit Nennisolation 10 am Hauptkern für die Anspeisung einer 8-kV-Schaltanlage zum Anschluss des Erregertransformators und des Eigenbedarfstransformators für sämtliche betriebswichtigen Hilfsantriebe des Maschinensatzes. Ferner wird dem 220-kV-Netz über die dritte Wicklung auch noch die Anfahrleistung des Anfahr motors entnommen. Zwischen 240 und 7,875-kV-Wicklung mit Schaltgruppe Yd 5 besteht die Kurzschlussleistung von 15,9%. Um die Sicherheit der Eigenbedarfsanlage zu erhöhen, ist in Serie zur dritten Wicklung eine Drosselspule geschaltet, die den Kurzschlussstrom begrenzt. Diese Drosselspule befindet sich ebenfalls im Kessel des Maschinentransformators; sie ist an Konsolen des Hauptkernes angebaut. Dadurch sind die beiden Übertragungsrichtungen 240 kV/21 kV oder 21 kV/240 kV freizügig und unabhängig von der Übertragungsrichtung 240 kV/7 kV zu betreiben.

Die dritte Wicklung braucht die Anfahrleistung nur während 70 s Betriebsdauer des Anwurf motors übertragen. Zusammen mit der Grundlast für Eigenbedarf und Erregung bedeutet dies eine Kurzzeitbelastung der dritten Wicklung entsprechend 43 MVA.

11. Kraftwerks-Hilfs- und Nebenanlagen

Die *Maschinenableitung* ist ein etwa 68 m langes Drehstromsystem für 10000 A als Verbindung der Ständeranschlussklemmen des Motorgenerators mit den 21-kV-Durchführungen des Maschinentransformators. Jede Phase besteht aus Aluminium-Rohrprofil (480 mm Aussendurchmesser und 12 mm Wandstärke) mit drei Giessharzstützern bei jedem der 78 Stützpunkte abgestützt auf einem Aluminium-Kapselrohr (900 mm Aussendurchmesser und 5 mm Wandstärke). Im Leitungszug sind flexible Aluminium-Dehnungsbänder und für die Anschlüsse hochflexible Kupferdehnungsbänder angeordnet. Die Kapselrohre gleiten über entsprechend ausgebildete Stützfüsse und enthalten an gewissen Verbindungsstellen flexible Metallfaltenbälge. Grundsätzlich ist jede Rohrkapselung von Anfang bis Ende leitend durchverbunden, indem die 6 m langen Rohrschüsse auf der Anlage miteinander verschweisst werden. Am Motorgenerator und am Maschinentransformator wird die Kapselung aller drei Phasen kurzgeschlossen und geerdet. Die Kapselrohre führen ungefähr die gleiche Stromstärke wie die konzentrisch angeordneten Leiterschienen und verhindern damit jede Feldwirkung nach aussen: Es entsteht ausserhalb der Kapselrohre keine Kraftwirkung; in der Umgebung wird sich kein Wirbelstrom ausbilden; daher können umgebende Bauteile bzw. Gerüste nicht erwärmt werden (Vermeidung von Zusatzverlusten). Phasenkurzschlüsse sind durch die Kapselung praktisch ausgeschlossen. Im Bereich der Maschinenableitung muss mit einem Stosskurzschlussstrom von 180 kA_{sw} netzseitig und mit 140 kA_{sw} maschinenseitig gerechnet werden. Doppelerdschlüsse sind zwar äusserst unwahrscheinlich, können jedoch nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Deshalb ist das gekapselte System thermisch für diese Verhältnisse dimensioniert.

Die Kapselrohre sind von Anfang bis Ende staub- und gasdicht ausgebildet. Das Innere dieser Rohre erhält keine künstliche Kühlung, wird aber auch nicht unter Überdruck gestellt. Die Ableitung verläuft durch verschiedene Tiefgeschosse des Kraftwerkschachtes, welche in ungünstigen Fällen eine Raumtemperatur bis zu 35 °C annehmen können. Unter der Annahme einer normalen Durchlüftung des Kraftschachtes nimmt die Oberfläche der Kapselrohre bei einer Vollaststromstärke eine Temperatur von rund 50 °C an. Sollte sich im oberen Teil der vertikal verlegten Maschinenableitung eine höhere Oberflächentemperatur ergeben, können mit Luftfilter versehene Öffnungen in den Kapselrohren angeordnet werden, welche für eine natürliche Luftzirkulation sorgen.

Wie erwähnt, wird die Maschinenableitung an beiden Enden über die Kurzschlussbrücke mit der Erdungsanlage des Motorgenerators bzw. mit der Erdungsanlage des Maschinentransformators verbunden. Die einzelnen Traggerüste der Maschinenableitung sind mit Erdleitungen an die Kapselrohre angeschlossen.

Während der Planung der Maschinenableitung wurde berechnet, dass die Summe der Verluste in den Stromschiene und in der Kapselung kleiner sein wird als bei einer ungekapselten Maschinenableitung, wenn man die Wirbelstromverluste in den angrenzenden Gerüsten und Bauwerkstrukturen berücksichtigt. Ausser den betriebstechnischen Vorteilen weist die leitend gekapselte Schienenausführung auch die geringere Jahresverlustleistung auf.

Der Motorgenerator wird mit einem *21-kV-Lastschalter* synchronisiert und betriebsmässig abgeschaltet. Der Lastschalter wird bei allen mechanischen Fehlern im Bereich des Maschinensatzes und bei jenen elektrischen Schutzabschaltungen, bei denen hohe Kurzschlussströme nicht auftreten können, immer betriebsmässig geschaltet. In Kurzschlussfällen wird die Maschine samt dem Blocktransformator vom 220-kV-Leistungsschalter der Freiluftanlage vom Netz ge-

trennt. Wie erwähnt, handelt es sich um einen 5poligen Druckluftschalter, von dem jeweils drei Pole für die entsprechende Betriebsdrehrichtung betätigt werden. Die einzelnen Pole sind für sich leitend gekapselt und mit je einem Druckluftantrieb versehen, also phasentrennt in einem Schalterraum angeordnet. Die Kapselrohre der einpoligen Schaltgeräte sind über hochflexible Kupferdehnungsbänder (und Neoprene-Faltenbälge zur Dichtung) mit den Kapselrohren der Maschinenableitung fest verbunden. Die Geräte erhalten einen Isolationspegel entsprechend 170 kV_{sw} Stossbeanspruchung. Sie können für eine maximale Betriebsspannung von 30 kV betrieben werden und sind für eine Prüfwechselspannung gegen Erde von 75 kV und über die offene Trennstrecke von 100 kV bemessen. Der Lastschalter kann einen Ausschaltstrom von 20 kA bei einer Steilheit der wiederkehrenden Spannung von 1000 V/μs mit einer Ausschaltzeit von 65 ms bewältigen. So wie die Maschinenableitung sind auch die Schalter selbstkühlend.

Es sei noch erwähnt, dass der Trennschalter, welcher zum Zwecke des elektrischen Bremsens die drei Phasen im Zuge der Maschinenableitung kurzschliesst, während dieses Vorganges den Bremsstrom von 11100 A während 70 s führt. Der Bremsvorgang kann sich nach einer Pause von 6 min noch zweimal wiederholen.

Der Eigenbedarf ist, wegen des stets am 220-kV-Netz angeschlossenen Maschinentransformators, an der für das Anfahren in den Pumpbetrieb entsprechend dimensionierten dritten Wicklung angeschlossen. Für gelegentliche Maschinenversuchsläufe oder Messungen ohne Maschinenlast können der Eigenbedarf und die Erregerleistung (also bei abgeschaltetem Maschinentransformator) von der 20-kV-Anlage des benachbarten Rodundwerkes I bezogen werden, welche normalerweise nur den nicht betriebswichtigen Eigenbedarf versorgt. Ein Reservetrafo, welcher gleicherweise an die Stelle des Erregertransformators oder des Eigenbedarfstransformators treten kann, ist angeschafft worden.

Der Maschinensatz des Rodundwerkes II wird von der bestehenden Warte des Rodundwerkes I (erstellt im Jahre 1943 für vier Maschinensätze, wovon einer ein Pumpenspeichersatz ist) aus gesteuert und überwacht. Zu diesem Zweck erhalten die hydraulischen und elektrischen Nebenanlagen wie elektronischer Turbinenregler, Kugelschieber, Erregersystem, Kühlanlagen, Spannungsregler, Lagerölversorgung, Anlasssystem des Anwurfmotors usw. komplett mit allen Regel-, Schutz- und Meldeeinrichtungen ausgestattete Teilautomatiken. Neben der betriebs sicheren Fernsteuerung mit kurzen Betriebsübergängen kommt dem ausreichenden Informationsinhalt der Gefahrmeldealagen in den Bereichen Rodundwerk I und Rodundwerk II grosse Bedeutung zu. Grundsätzlich wird sich im Rodundwerk II kein Personal aufhalten, jedoch kann bei gestörter Fernsteuerung vorübergehend auch vom Rodundwerk II aus der Maschinensatz automatisch in den Netzbetrieb gebracht werden. Normalerweise wird der Maschinensatz an die Netzkennlinienregulierung des Verbundsystems angeschlossen. Nach Reparaturen oder bei Inbetriebsetzung nach Revisionen werden von den Steuerstellen des Rodundwerkes II aus die einzelnen Abschnitte der Automatiksteuerung erprobt.

Ein *Kran* von 300 Mp überspannt die Montagehalle. Die Lasthaken erreichen die untersten Geschosse des Kraftschachtes. Der ungeteilte Rotor der Synchronmaschine ist der schwerste Maschinenteil; er kann mit maximal 1 m/min gehoben und abgesenkt werden. Das Haupthubwerk ist umschaltbar auf 50 Mp, wobei eine 6fache Hubwerkgeschwindigkeit erreicht wird. Ferner ist der Kran noch mit zwei Hilfhüben für je 5 Mp ausgestattet. Die vier Seiltrommeln des Haupthubes werden über eine Ölhydraulik angetrieben,

mit der es möglich ist, die Geschwindigkeit stufenlos zu regulieren. Bei einer geforderten Hubhöhe von 52 m und 24facher Einsicherung im Flaschenzug ergibt sich eine Hubseillänge von rund 1400 m.

Das Sperrwasser für die Gleitringstopfbüchse und geringe an anderen Stellen anfallende Drainagewassermengen werden in den Pumpensumpf der Lenzanlage geleitet und von dort ins Unterwasser gefördert. Hierzu dienen zwei Pumpen mit einer Förderleistung von je 40 l/s. Im weiteren münden die Druckschachtestentleerung und die Entleerung des Unterwasserkanals in den Lenzpumpensumpf. Zur Förderung der bei Entleerung anfallenden grossen Wassermengen und bei allfälligen kleineren Leckagen sind noch drei weitere elektrisch angetriebene Pumpen mit einer Förderleistung von je 140 l/s vorgesehen. Auch ist ein Ejektor eingebaut worden, der sein Antriebswasser aus der Falleitung erhält und 500 l/s fördert.

12. Die Kosten

Das Rodundwerk II hat einschliesslich Eigenleistungen und Bauzinsen rund 910 Mio öS gekostet. Dem entsprechen spezifische Ausbaurkosten von 3370 öS/kW. Die Gesamt-

kosten setzen sich zusammen aus 54% für die baulichen Anlagen, 21% für die hydraulisch-maschinellen Anlagen und den Stahlwasserbau, 22% für die elektrisch-maschinellen Anlagen und 3% für den Grunderwerb.

13. Auftragnehmer

Motorgenerator und Anwurfmotor:	Elin Union, Wien, als Hauptauftragnehmer und Siemens AG, Berlin und München, als Nebenunternehmer
Haupttransformator:	Elin Union, Wien
Maschinenableitung und Lastschalter:	Österreichische Brown-Boveri-Werke, Wien
Pumpturbine:	J. M. Voith AG, Maschinenfabrik, St. Pölten
Kugelschieber:	Hydro-Progress AG, Maschinen- und Apparatebau, Kriens, Schweiz
Kran:	Hans Künz, Maschinenfabrik GmbH, Hard
Kühlwasser- und Lenzpumpenanlage:	G. Rumpel Aktiengesellschaft, Werk Wels, Wels
Druckschachtpanzerung:	VÖEST-Alpine Aktiengesellschaft, Linz
Stahlwasserbauanlagen:	J. M. Voith AG, Maschinenfabrik, St. Pölten Waagner Biro Aktiengesellschaft, Wien VÖEST-Alpine Aktiengesellschaft, Linz

Brandversuche mit Chemiewerkstoffen

Das Verhalten organischer Werkstoffe im Falle eines Brandes lässt sich nicht allein durch Versuche im Labormassstab beschreiben. Eine anwendungsbezogene Brandforschung ist nicht ohne Grossversuche, insbesondere praxisnahe Brandversuche in natürlichem Massstab, möglich. Zur Verstärkung ihrer Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des Brandverhaltens von Chemiewerkstoffen hat die Bayer AG daher im *Leverkusener Werk* ein modernes Brandversuchshaus errichtet. Es enthält einen Raum, in dem das Brandverhalten von *Fertigteilen bis hin zu kompletten Wohnungseinrichtungen* praxisnah untersucht werden kann, und ausserdem moderne Einrichtungen für *genormte Baustoff- und Bauteilprüfungen*. Ge-

plant ist, dem Brandversuchshaus später ein Laborgebäude anzugliedern, in dem die bereits bestehenden Einrichtungen für Brandversuche im Labormassstab zusammengefasst werden sollen. Umfangreiche Abgasreinigungsanlagen sorgen dafür, dass auch bei Grossversuchen jede Belästigung der Umwelt durch Rauch- oder Verbrennungsgase ausgeschlossen ist.

Chemiewerkstoffe dringen in immer neue Anwendungsgebiete vor. Dass dabei die Brandsicherheit gewährleistet ist, lässt sich in vielen Fällen nur durch Versuche mit Fertigteilen in natürlichem Massstab nachweisen. Insbesondere gilt das dann, wenn für den Einsatzbereich noch *keine brandsicherheitslichen Prüfverfahren und Anforderungen* vorliegen, oder wenn

Brandversuchshaus der Bayer AG in Leverkusen. In der Anlage sollen Brandversuche mit Chemiewerkstoffen unter Praxisbedingungen durchgeführt werden. Umfangreiche Abgasreinigungsanlagen schützen die Umgebung vor lästigen Rauch- und Verbrennungsgasen

Brandversuch an einem Fassadenprüfstand (rechts). An einer selbsttragenden Fassade aus Legupren-Leichtbeton mit GFK-Deckschichten wird die Brandausbreitung über die Fassadenoberfläche untersucht. Die Versuche wurden mit dem Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen durchgeführt

