Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 89 (1971)
Heft: 15

Artikel: Der Endausbau des Pumpspeicherwerkes Vianden
Autor: Wehenkel, Louis
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84823

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: 07.01.2026

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Aufruf zur Schweizer Mustermesse 1971

Schweizer Mustermesse Basel 17. - 27. April 1971

Hunderttausende von Besuchern werden wieder zur Schweizer Mustermesse erwartet; die beflaggte Messestadt am Rhein wird vom 17. bis 27. April Ziel von Einkäufern und Interessenten aus dem ganzen Land und aus allen Erdteilen sein. Allen voran die mehr als 2500 Aussteller, aber auch Bevölkerung und Behörden der Stadt und die Messeleitung freuen sich über diesen Besuch und haben alles vorgekehrt, ihn für die ungezählten Gäste so angenehm und nutzbringend wie möglich zu gestalten. Die bewährte Gastlichkeit der Messestadt und das vielgestaltige Angebot schaffen für die Einkäufer aus aller Welt die frohgestimmte Atmosphäre für den guten Verlauf des Messegeschäfts. Getreu ihrer Aufgabe, Ort der Begegnung von Angebot und Nachfrage zu sein, ist auch die diesjährige, 55. Schweizer Mustermesse darauf ausgerichtet, die qualitativ hochwertigen Erzeugnisse von Industrie und Gewerbe unseres Landes so übersichtlich geordnet vorzulegen, dass das Prüfen, Vergleichen und Auswählen zu einem für alle Beteiligten erspriesslichen Abschluss führen wird. So werden die elf Messetage ein gerne benützter Anlass sein, die Reise nach Basel zu unternehmen. Alle Besucher aus nah und fern seien eines herzlichen Willkomms gewiss!

Schweizer Mustermesse

Der Präsident: Dr. E. Wyss Der Direktor: Dr. H. Hauswirth

Der Endausbau des Pumpspeicherwerkes Vianden

DK 621.221.4

Von Dipl.-Ing. **Louis Wehenkel**, Vianden

Zusammenfassung: Die Société Electrique de l'Our, Luxemburg, hat beschlossen, die Leistung des Pumpspeicherwerkes Vianden an der deutsch-luxemburgischen Grenze durch den Bau einer zusätzlichen Pumpturbine in einem Schachtkraftwerk – 2 km vom jetzigen Kraftwerk entfernt – von 900 auf 1100 MW zu erhöhen. Wie bereits der erste Ausbau vor acht Jahren, wird der Bau dieser nachstehend beschriebenen Anlage, der «10. Maschine», eine neue technische Spitzenleistung darstellen.

1. Das bestehende Kraftwerk

1.1. Die topographischen Gegebenheiten

Die Vorbedingungen zum Bau eines grossen Pumpspeicherwerkes waren im Ourtal flussaufwärts von Vianden aussergewöhnlich günstig. Die Hochebene der Luxemburger Ardennen ist dort, wie aus den Bildern 1 und 2 ersichtlich, nur wenige hundert Meter von dem tief eingeschnittenen, bewaldeten und nur dünn besiedelten Tal entfernt. Geologische Untersuchungen, die am Ende der fünfziger Jahre unternommen wurden, zeigten, dass der im Bereich der Anlage anstehende untere Devon aus grobkörnigem, sehr kompaktem Tonschiefer besteht. Dieser Fels eignet sich bestens für den Bau von Stollen, Kavernen, Schächten und Talsperren und liefert ausserdem ein ausgezeichnetes Material für Dammschüttungen.

1.2. Die Anlagen

Das jetzige Kraftwerk, genannt «Vianden I», wurde in den Jahren 1959–64 gebaut. Da der obere Speicher keinen natürlichen Wasserzufluss besitzt, arbeitet die Anlage als reines Pumpspeicherwerk mit Tagesumwälzbetrieb in geschlossenem Kreislauf. Das zweiteilige, künstliche Oberbecken liegt auf einer Höhe von etwa 500 m ü. M. auf dem St. Nikolausberg, während das Unterbecken durch die Beton-Staumauer Lohmühle direkt oberhalb von Vianden geschaffen wurde. Beide Becken haben gleichen Nutzinhalt und weisen einen mittleren Höhenunterschied von 280 m auf.

In Vianden I befinden sich neun Pumpspeichersätze (Bild 3) mit horizontalen Wellen, deren Einheitsleistung im Generatorbetrieb 100 MW und im Pumpbetrieb 70 MW beträgt [1]). Das Maschinenhaus wurde als Kaverne gebaut, und zwar an der Stelle, wo die Entfernung der beiden Becken am kürzesten ist. Zwei stahlgepanzerte Druckschächte von 480 und 680 m Länge verbinden das Kraftwerk mit dem Oberbecken.

1.3. Einsatz und Betriebsweise

Über 220-kV-Freileitungen ist das Pumpspeicherwerk Vianden direkt an das Netz der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke AG (RWE) und darüber hinaus an das europäische Verbundnetz angeschlossen. Durch seine Grösse sowie seine geographische Lage bildet es eine natürliche Ergänzung dieser vorwiegend aus thermischen Kraftwerken gespeisten Netze. Die grossen Braunkohlenwerke im Raum Köln–Aachen sind seine wichtigsten Pumpstromlieferer, während der erzeugte Spitzenstrom hauptsächlich in die dicht besiedelten Gegenden des Rheinlandes und des Ruhrgebiets fliesst.

Der Nutzinhalt der Becken beträgt 6 Mio m³. Das Kraftwerk ist hiermit für einen Arbeitszyklus von 4½ Stunden Generatorbetrieb und 8 Stunden Pumpbetrieb vorgesehen. Während der Schwachlastzeiten, hauptsächlich nachts, wird die in den thermischen Kraftwerken erzeugte Überschussenergie als potentielle Wasserenergie aufgespeichert, um tagsüber in hochwertigen «Spitzenstrom» umgewandelt zu werden. Darüber hinaus beteiligen sich die

[1]) Die Speicherpumpen sind beschrieben in SBZ *80* (1962), H. 26, S. 465.

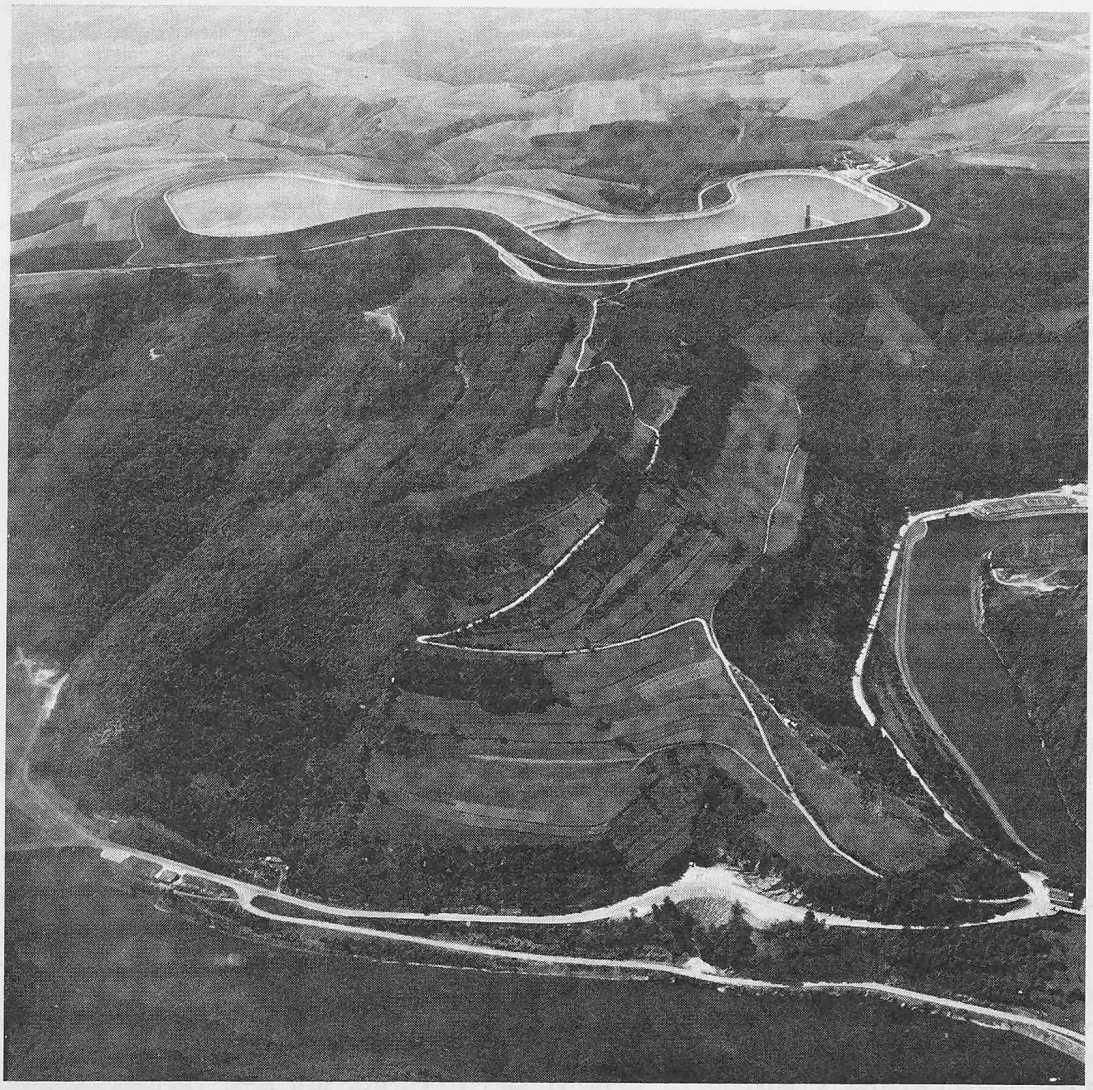


Bild 1. Gesamtansicht von Oberbecken, Unterbecken und Kaverneneingang der Anlage Vianden I (rechts) und Baustelle des neuen Kraftwerkes (links) Blick gegen Südwesten

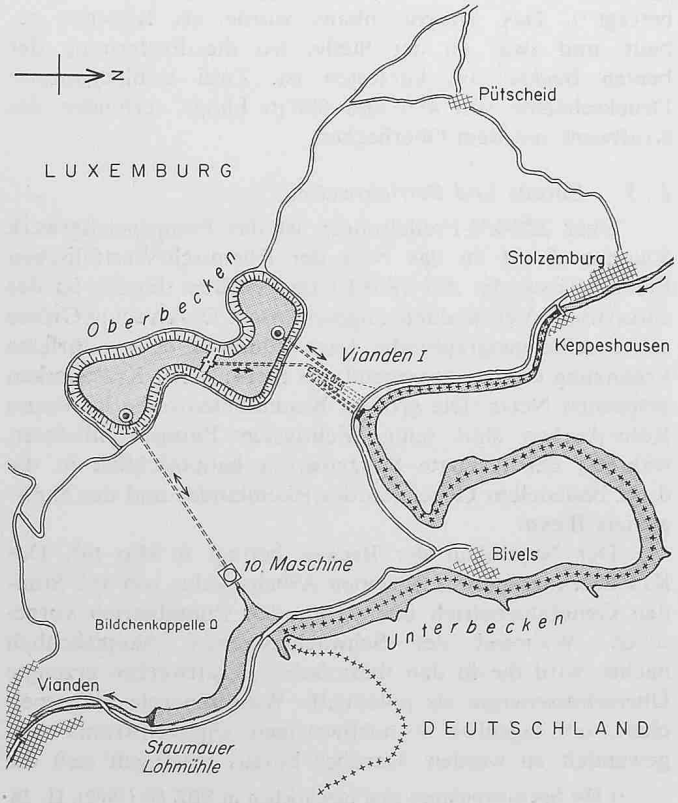


Bild 2. Vianden I und 10. Maschine, allgemeiner Lageplan 1:50 000

Pumpspeichersätze wegen ihrer ausserordentlich kurzen Schalt- und Stellzeiten in einem beachtlichen Mass an der Frequenzhaltung und bilden eine besonders zuverlässige Momentanreserve für das Netz.

Eine Folge dieser Betriebsweise ist jedoch, dass die Beckenkapazität mit Rücksicht auf die Sicherheit des Netzes zur Erhaltung einer Reserve oft nicht voll ausgenützt wird. Bei der Projektierung des Kraftwerkes wurde eine jährliche Produktion von 1300 Mio kWh vorgesehen, welche ungefähr einer Betriebszeit von 1600 Stunden Volllast entspricht. In Wirklichkeit wurden in den Jahren 1964 bis 1969 durchschnittlich nur etwa 800 Mio kWh oder 1000 Vollaststunden erreicht. Ein zweiter Grund für diese relativ geringe Stundenzahl ist die Knappheit an Pumpzeit, die im folgenden Kapitel weiter erläutert werden soll.

Die Sicherheitsfunktion der Anlage sowie die kurzen Laufzeiten waren ihrerseits zwei Hauptfaktoren bei der Planung der ersten Ausbaustufe und der 10. Maschine. Den projektierenden Ingenieuren wurde die Aufgabe gestellt, möglichst niedrige Baukosten zu erzielen, ohne jedoch die Betriebssicherheit zu beeinträchtigen. Eine hohe Verfügbarkeit durch Verringerung der Ausfälle, der Wartung und des Verschleisses ist in Vianden wichtiger als maximale Wirkungsgrade.

2. Die Begründung des Neuausbaus

In einem reinen Pumpspeicherwerk wie Vianden wird die installierte Leistung bei gegebener Beckenkapazität hauptsächlich durch die verfügbare Zeit für Generator- und

Pumpbetrieb bestimmt. Seit der Projektierung von Vianden I – etwa in den Jahren von 1955 bis 1960 – haben sich die Bedingungen des Netzes stark verändert. Die täglich verfügbare Pumpzeit hat sich von 8 auf etwa 6½ Stunden verringert, vor allem infolge zunehmender Fernsehgeräte und der dadurch verursachten Verschiebung der Abendspitze (Bild 4). Diese Entwicklung war bereits um 1962, das heisst bei der Inbetriebnahme der ersten Maschine in Vianden sichtbar, und schon damals wurde eine Vergrösserung der Anlage durch einen 10. Maschinensatz erwogen. Da jedoch die schon weit fortgeschrittenen Bauarbeiten eine Erweiterung der bestehenden Kaverne nicht mehr gestatteten, wurde die Errichtung eines räumlich getrennten Kraftwerkes geplant.

3. Die bautechnischen Anlagen des neuen Kraftwerks

3.1. Das Schachtkraftwerk

Wie aus Bild 2 ersichtlich, ist etwa 1 km flussaufwärts von Lohmühle, nördlich der «Bildchen-Kapelle», der Abstand der beiden Becken an einer zweiten Stelle verhältnismässig gering. Obwohl diese Lage nicht so günstig ist wie die des heutigen Kraftwerkes Vianden I, besteht dort die Möglichkeit, die Staubecken durch einen dritten Druckstollen zu verbinden. Im Gegensatz zum Kraftwerk Vianden I wird der neue Maschinensatz mit seinen Hilfseinrichtungen in einen zylinderförmigen Schacht von 22,20 m lichtem Durchmesser und 50 m Tiefe in unmittelbarer Nähe des Unterbeckens eingebaut (Kote des oberen Montagepodiums 230 m ü. M.; Tiefstpunkt 180 m ü. M.). Für die 10. Maschine war die Schachtbauweise vor allem aus wirtschaftlichen Gründen der Kavernenbauweise vorgezogen worden. Ihre wichtigsten technischen Vorteile sind die bessere Zugänglichkeit zur Baustelle und zum Kraftwerk und vor allem die mit der Verkürzung des Unterwasserstollens erreichten günstigeren hydraulischen Bedingungen.

Bis zum Herbst 1970 war der Kraftwerkschacht mit den Fundamenten der anliegenden Betriebsräume bis auf 7 m Tiefe ausgehoben. In diesem oberen Bereich wird vorerst die Schachtwand mit zwei umlaufenden Rundgängen und den daran grenzenden Räumen zur Sicherung des Felsens betoniert. Erst danach wird der untere Teil des Schachts ausgesprengt und dann von unten nach oben betoniert. An der Südwand ist die Standsicherheit des Bauwerks durch schräge, mit Ton gefüllte Felsklüfte, welche durch vorhergehende Sondierungen geortet wurden, gefährdet. In diesem Bereich wird der Schacht durch etwa hundert, ein Gewölbe bildende, 145 Mp-Vorspannanker von 10 bis 20 m Länge gesichert.

3.2. Die Verbindung mit den Staubecken (Bild 5 und 6)

Der Maschinenschacht wird mit dem Oberbecken durch eine unterirdische stahlgepanzerte Druckrohrleitung von 1300 m Länge und 4500 mm lichtem Durchmesser verbunden (Bild 5). Dieser Stollen besteht im wesentlichen aus einem senkrechten, einem um 28,5 gr (25,65 °) geneigten und einem waagerechten Teil. Das Einlaufbauwerk sowie die anschliessende 80 m lange Vertikalstrecke wurden bereits beim Bau von Vianden I ausgeführt. Ein Zufahrtstollen zum oberen Knie ist ebenfalls vorhanden, so dass der Ausbruch und der Einbau der Panzerung ohne Betriebseinschränkung des jetzigen Kraftwerkes beginnen können. Der Ausbruch wird von unten nach oben über einen zweiten Zufahrtstollen in der Nähe des Schachtkraftwerkes durchgeführt.

Für das Ausbohren dieses Stollens verwendet man erstmals eine in Frankreich entwickelte, neuartige Stollenbohrmaschine, deren vier Meissel auf beweglichen Armen aufgebaut sind und ähnlich wie die Werkzeuge einer Drehbank wirken. Gegenüber dem konventionellen Ausbruch durch Sprengen lässt sich bei dieser Methode eine grösstmögliche Schonung des Gebirges und ein viel regelmässigeres Profil erreichen. Daraus ergeben sich beträchtliche Ausbruch- und Betoneinsparungen. Gegenüber den bisherigen Stollenbohrmaschinen, deren Meissel fest auf einer drehenden Platte montiert sind, weist die in Vianden verwendete Maschine folgende Vorteile auf: Einerseits kann man den Fels beim Aushub laufend beobachten. Anderseits bleiben die Meissel dauernd mit dem Fels in Kontakt und werden dadurch weniger stossbeansprucht. Trotz ihrer kleineren Zahl dürfte aus diesem Grund ein verhältnismässig geringerer Verbrauch zu erwarten sein. Dank der Austauschbarkeit der Arme kann die Maschine für verschiedene Stollendurchmesser und Felsqualitäten benutzt werden. Dadurch ist ihre Wirtschaftlichkeit auch bei kürzeren Stollenstrecken gesichert.

Der Einbau der Panzerungsbleche und das Hinterbetonieren werden von oben nach unten ausgeführt. Das Material gelangt durch den oberen Zufahrtstollen vor Ort. Die Panzerung wird, wie bei Vianden I, nicht für die Auf-

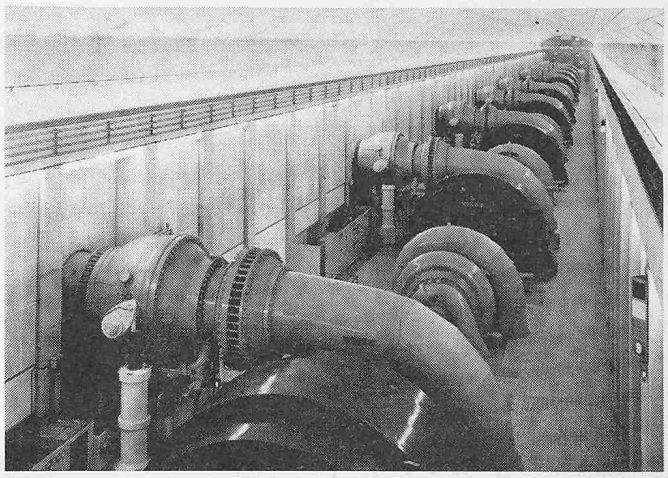


Bild 3. Vianden I; Ansicht der Maschinenkaverne

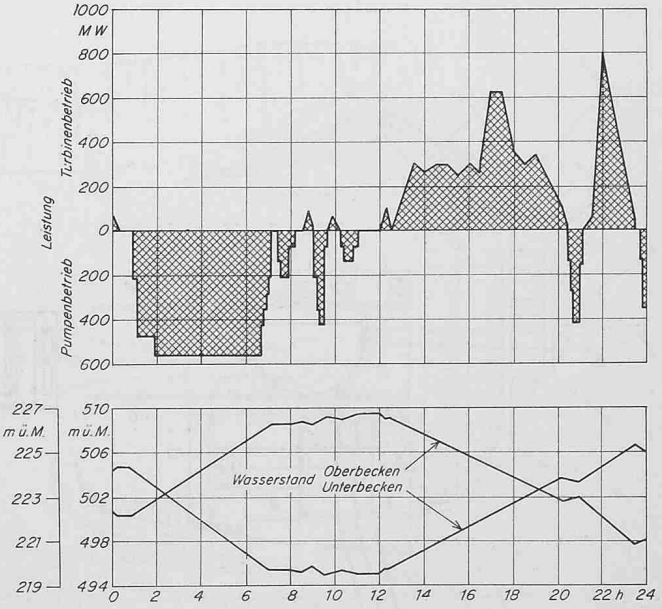


Bild 4. Belastungsdiagramm eines charakteristischen Tages des Jahres 1969

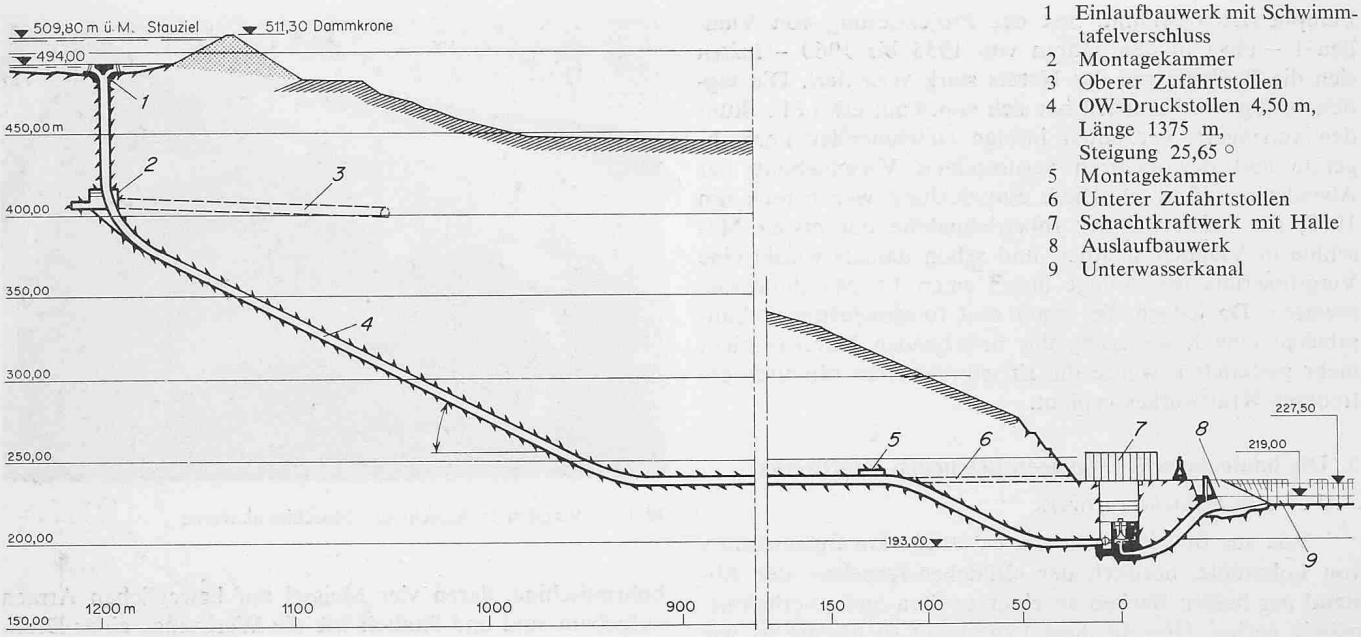


Bild 5. Längsschnitt durch Druckstollen, Schachtkraftwerk und Unterwasserstollen. Längen 1:4000, Höhen 1:5000

nahme des vollen Gebirgswasserdrucks bemessen. Eine parallellaufende Drainage mit Spül- und Reinigungsmöglichkeiten soll während des Betriebs dauernd offen bleiben.

Vom Kraftwerkschacht führt ein sehr kurzer Unterwasserstollen zum Our-Stausee. Dieser Stollen und der untere Teil des Druckstollens, die nicht durch die Bohrmaschine erreichbar sind, werden durch Sprengen ausgehoben. Der Unterwasserstollen mündet in das Seitental der Our, das als Unterwasserkanal dient und dazu etwas verbreitert und vertieft wird.

Die Verschlussorgane auf der Saugrohrseite sind Rollschützen, die ins Auslaufbauwerk eingebaut werden. Im Notfall können diese mittels Fernsteuerung von der Schaltwarte Vianden I aus gesenkt werden. Gegenwärtig (anfangs 1971) ist der Ausbruch des Auslaufbauwerks und des Unterwasserkanals zum grossen Teil beendet, und die Betonierarbeiten der Sohle haben begonnen (Bild 7a).

Während der Errichtung des Kraftwerkes wird die Baugrube durch einen Absperrdamm mit einer Spundwand zeitweilig vom Rest des Unterbeckens getrennt. Am 15. Juni 1970 konnte die Baustelle ohne besondere Schwierigkeiten trocken gelegt werden.

4. Die mechanischen Einrichtungen

4.1. Allgemeines

Bei der Konstruktion des Pumpspeichersatzes waren die bereits in der Einleitung genannten Grundsätze massgebend. Ganz besonderer Wert musste hier auf die Betriebssicherheit und die Zuverlässigkeit des Materials gelegt werden. Daneben waren auch die Montage und Demontage sowie Fragen der Wartung, der Raumausnutzung und der Zugänglichkeit von entscheidender Bedeutung.

Der senkrecht angeordnete, umkehrbar arbeitende Maschinensatz läuft mit 333 U/min. Die Hauptvorteile dieser Bauweise gegenüber den konventionellen Pumpspeichersätzen bestehen in ihrer bemerkenswerten Einfachheit und ihrem viel geringeren Raumbedarf. Daraus ergibt sich eine beträchtliche Einsparung an Bau- und Maschinenkosten und eine Vereinfachung der Hilfseinrichtungen, der Steuerung und der Wartung. Demgegenüber zeichnen sich die kon-

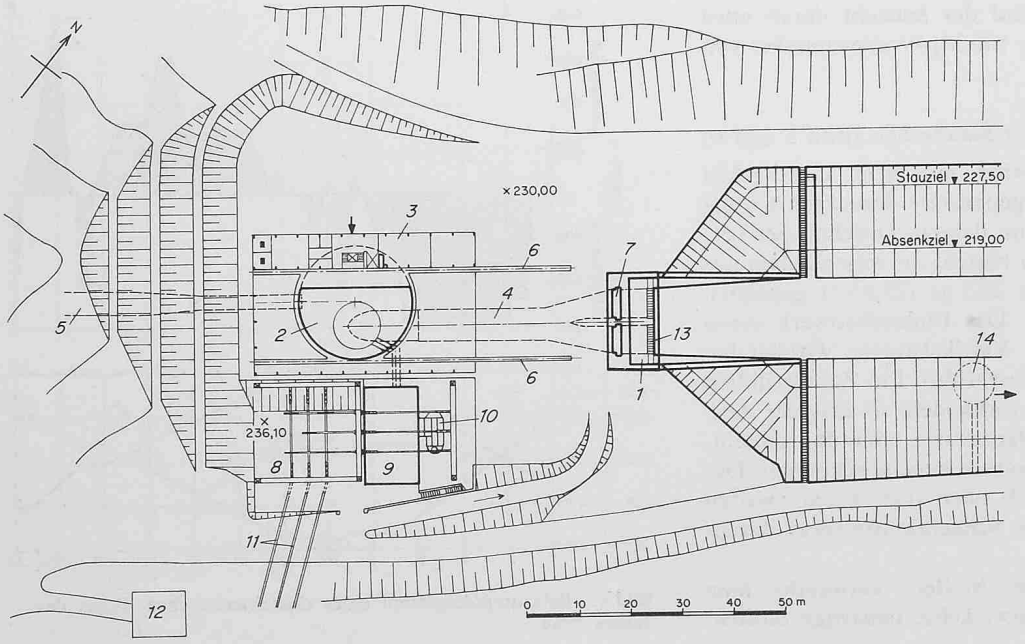


Bild 6. Lageplan von Schachtkraftwerk und Umgebung, 1:1500

1 Auslaufbauwerk
2 Kraftwerkschacht
3 Betriebsgebäude
4 Unterwasserstollen
5 Druckstollen
6 Kranbahnschienen
7 Schnellschlussschützen
8 Freiluftschaltanlage
9 15,75-kV-Schalthaus
10 Transformator 245/15,75 kV
11 Energieableitung
12 Kühlwasserhaus
13 Rechen
14 Kühlwasser-Entnahmeturm

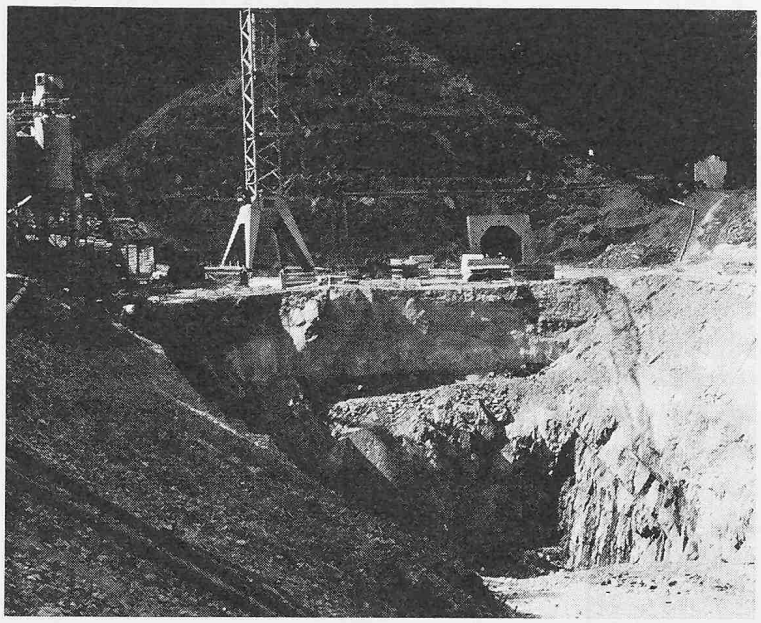


Bild 7a. Ansicht der Baustelle, August 1970. Im Vordergrund die Baugrube des Auslaufbauwerks

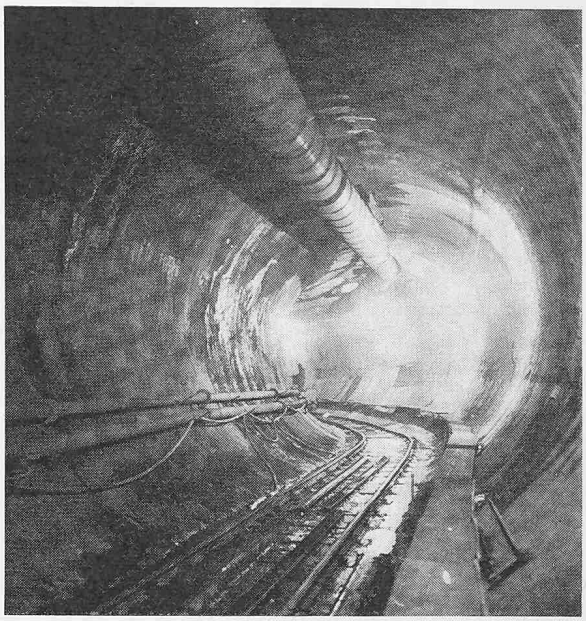


Bild 7b. Unterer Zufahrtstollen, 7. Januar 1971

ventionellen Pumpspeichersätze mit getrennten Maschinen durch kürzere Anfahr- und Umstellzeiten und einen etwas besseren Gesamtwirkungsgrad aus. Dieser ergibt sich daraus, dass die Pumpe und die Turbine unabhängig voneinander bemessen werden können.

Beim Bau des Kraftwerkes Vianden I verfügten die grossen europäischen Turbinenhersteller noch nicht über jene Erfahrungen mit Umkehrmaschinen, die genügt hätten, um diese an Grossanlagen anzuwenden. Zwei Hauptprobleme, die hydraulische Formgebung des Turbinenrades und das Anfahren bei Pumpbetrieb, wurden damals noch nicht genügend beherrscht. Beide Fragen werden im weiteren Verlauf dieses Berichts erläutert.

4.2. *Konstruktiver Aufbau der Umkehrmaschine*

Der senkrecht angeordnete Maschinensatz besteht aus zwei Hauptmaschinen: der Pumpturbine und der elektrischen Maschine. Der drehende Teil wiegt etwa 330 Mp. Wie bei herkömmlichen vertikalen Sätzen werden die elektrische Maschine über der hydraulischen und der Saugkrümmer darunter angeordnet. Das Aggregat ist mit einem Spurlager und zwei Führungslagern ausgerüstet. Das Spurlager befindet sich unmittelbar im oberen Turbinendeckel, woraus sich kürzeste Übertragungswege der Kräfte auf die Fundamente ergeben; dabei wirkt das Gewicht des Läufers dem von unten nach oben wirkenden Wasserdruck entgegen und entlastet dadurch den oberen Turbinendeckel. Das erste Führungslager ist unter dem Spurlager angeordnet, das zweite in den oberen Armstern der Synchronmaschine eingebaut.

4.3. *Hauptdaten der Pumpturbine* (Bild 8)

Das Gesamtgewicht der Pumpturbine beträgt etwa 600 Mp. Die Maschine ist für Fallhöhen zwischen 266,50 und 291,55 m konstruiert. Für diese beiden Werte erhält sie folgende Hauptdaten:

Fallhöhe	266,50	291,55	m
Pumpbetrieb			
Förderstrom	74,1	63,2	m^3/s
Leistungsaufnahme	215	202	MW
Wirkungsgrad	91,5	90,5	%
Turbinenbetrieb			
Nennwasserstrom	71,6	76,5	m^3/s
Nennleistung	166	196	MW
Wirkungsgrad bei Nennleistung	90,2	91,2	%

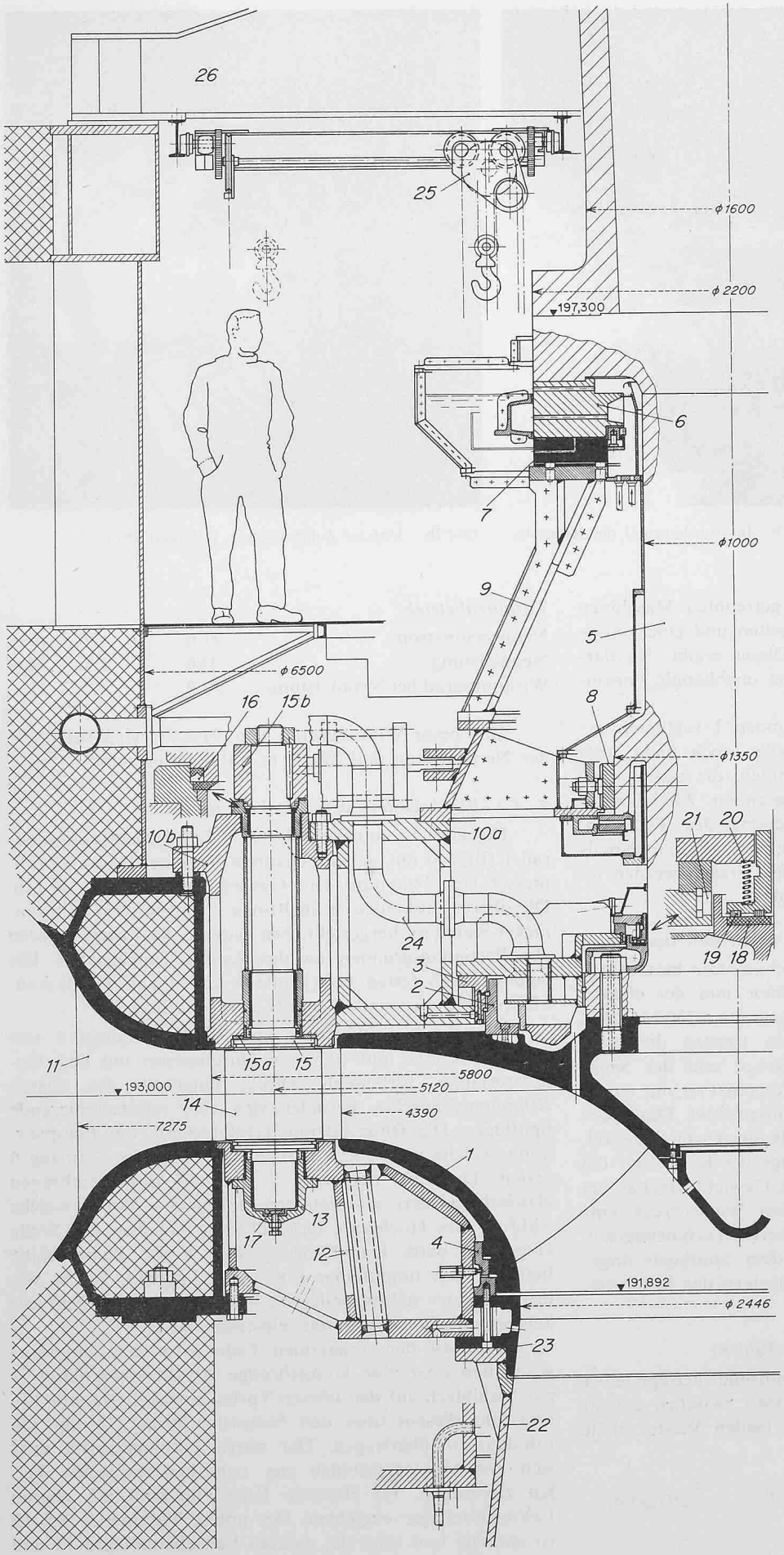
Der beste Wirkungsgrad von 91,9 % wird bei 85 % der Nennleistung und 291,55 m Fallhöhe erreicht.

4.4. *Beschreibung der einzelnen Bauteile*

Das aus Chromnickelstahl (17/4 Cr Ni) gegossene Laufrad 1 (Bild 8) mit sieben Schaufeln hat einen Aussendurchmesser von 4400 mm; sein Gewicht beträgt etwa 30 Mp. Die oberen ausbaubaren Spaltringe 2 sind aus 13/4-Chromnickel-Stahlguss hergestellt. Die unteren Spaltringe werden aus Fertigungsgründen an das Laufrad angegossen. Die beiderseitigen festen Labyrinthe 3 und 4 aus Aluminium-Mehrstoffbronze sind ebenfalls auswechselbar.

Das Laufrad ist durch einen Wellenstummel 5 von 3898 mm Länge und 1000 mm Durchmesser mit dem Generatorläufer verbunden. Direkt unterhalb des oberen Kupplungsflansches befindet sich das selbstschmierende Spurlager. Die Ölumwälzung erfolgt durch die Pumpwirkung, welche man durch radiale Bohrungen im Spurring 6 erzielt. Die zehn Segmente 7 sind auf Bunamembranen elastisch gelagert und erhalten Bohrungen, durch welche während des Hochlaufs Drucköl zum Anheben der Welle eingeführt wird. Das Führungslager 8 der Pumpturbine befindet sich unmittelbar über dem Laufrad. Es ist wie das Spurlager selbstschmierend ausgeführt und besteht aus Segmenten, die sich einzeln einstellen lassen.

Die Last der rotierenden Teile wird von den Spursegmenten über eine konusförmige Abstützkonstruktion 9 aus Stahlblech auf den oberen Turbinendeckel 10a und 10b und von diesem über den Stützschaufelring 11 auf die Fundamente übertragen. Der obere Turbinendeckel setzt sich aus Montagegründen aus zwei konzentrischen Teilen zusammen. Im äusseren Ring 10b sind die oberen Leitschaufellager eingebaut. Der untere Turbinendeckel 12 ist einteilig und trägt die unteren Leitschaufellager 13 und die unteren Labyrinthringe 4. Die Deckelschutzwände sind durch nichtrostende Auftragsschweissung gegen Korrosion geschützt. Der äussere Ring 10b ist aus Stahlguss herge-



Legende:

1 Laufrad
2 Oberer Spaltring
3 Oberer fester Labyrinthring
4 Unterer Labyrinthring
5 Turbinenwelle
6 Spurring des Spurlagers
7 Feste Spurlager-Segmente
8 Unteres Führungslager
9 Abstützkonstruktion
10a Innerer Teil des oberen Turbinendeckels
10b Äusserer Teil
11 Stützschaufelring
12 Unterer Turbinendeckel
13 Untere Leitschaufellager
14 Leitschaufel
15 Obere Leitschaufelteller
15a Fester Bremsring
15b Leitschaufelhebel
16 Als Servomotor wirkender Ringraum
17 Spurlager zu 14
18 Zweiteiliger Stopfbüchsring
19 Kohlen-Dichtungsringe
20 Stopfbüchsfeder
21 Stillstandsdichtung
22 Ausbaubares Saugrohrstück
23 Rostbeständiger Einsatzring
24 Entlastungsleitung
25 Rundlaufkran
26 Dreieckträger

Bild 8. Längsschnitt durch die Pumpturbine, 1:35

stellt, alle übrigen Teile der beiden Turbinendeckel sind Schweisskonstruktionen.

Die 16 Leitschaufeln 14 aus nichtrostendem Stahlguss (17/4 Cr Ni) sind im oberen Deckel 10b zweifach, im unteren Deckel 12 einfach gelagert. Sie werden durch beiderseits mit Öl betätigte Einzelservomotoren angetrieben. Beim Pumpbetrieb werden sie blockiert, um schädliche Schwingungen zu vermeiden. Hiefür ist jede Leitschaufel mit einem Servomotor versehen, der aus einem nach zwei Seiten abgedichteten Ringraum 16 besteht und sich zwischen dem Leitschaufelhebel 15b und dem Flansch der oberen Lagerbüchse befindet. Im Pumpbetrieb erhält der Ringraum 16 Drucköl, wodurch die Schaufel mit ihrem oberen Teller 15 gegen den Bremsring 15a drückt, der am Turbinendeckel 10b befestigt ist.

Die unten angebrachten Spurlager 17 der Schaufeln sind von aussen zugänglich und können während des Betriebs nachgestellt werden. Die Leitschaufeln sowie die Gelenke und Führungen der Servomotoren und Hebel sind in Teflon gelagert, so dass eine Fettschmierung ganz entfällt. Alle Leitschaufellager sind zwecks späterer Wartung ohne Demontage der Turbinendeckel ausbaubar. Nur die mittleren Lager werden vorher in den Turbinendeckel 10b eingepasst. Die Zentrierung der oberen und unteren Lagerbüchsen erfolgt bei der Montage durch Eingiessen konischer Kunststoffsitze, welche das spätere Ausheben ermöglichen.

Die als axiale Gleitringdichtung ausgeführte Wellenstopfbüchse befindet sich unterhalb des Führungslagers. Der drehende Teil ist unten angeordnet und besteht aus aufgeschraubten, zweiteiligen, auswechselbaren Ringen 18 aus nichtrostendem Stahl. Auf diesen Ringen schleifen die beiden Kohleringe 19, welche durch Federn 20 angepresst und mit druckseitig entnommenem Sperrwasser geschmiert werden. Die Kohleringe sind mehrteilig und schnell auswechselbar. Dank einer besonderen Vorrichtung ist der Ausbau ohne Absenken der Saugrohrschützen und Entleeren des Saugrohres möglich.

Die Spirale wird in vier Teilen angeliefert, die vor Ort zusammengeschweisst werden. Sie wird zur Dämpfung von Schwingungen elastisch in den Beton eingebettet. Ein einbetonierter Kragen überträgt den hydraulischen Schub auf das Bauwerk. Nur die 16 Stützschaufeln 11 sind aus Manganstahl gegossen, alle übrigen Teile der Spirale und des Traversenrings sind Stahlblechkonstruktionen.

Die Panzerung des Saugrohrs und des Krümmers wird auf einer Länge von 15 m einbetoniert, was zur Vermeidung unzulässiger Schwingungen, besonders bei Teillast im Turbinenbetrieb und beim Anfahren in den Pumpbetrieb nötig ist. Nur ein ausbaubares konisches Stück 22 von 2,7 m Länge unmittelbar unterhalb der Maschine bleibt frei. Der Zwischenring 23, welcher sich im turbulenten Bereich direkt unterhalb des Laufrads befindet, ist rostfrei ausgeführt.

4.5. *Demontage*

Aus Platzgründen verzichtet man auf den Ausbau des Laufrades von unten. Für Wartungsarbeiten und Kontrollen ist das Laufrad über Mannlöcher zugänglich. Am Dreieckträger 26, welcher die Bremsböcke der Synchronmaschine trägt, wird ein Rundlaufkran 25 befestigt, mit welchem man die Servomotoren, die oberen Teile des Leitapparates und dessen Antrieb, die oberen Leitschaufellager und die ausbaubaren Teile der Wellenstopfbüchse und der Lager demontieren kann.

Bei einer Generalüberholung, oder wenn die Demontage der Leitschaufeln notwendig ist, muss man alle rotierenden Teile durch die Statorbohrung des Generators ausbauen. Dazu werden zuerst das Generatorlager, der obere Führungsstern, der Läufer der Synchronmaschine, der Dreieckträger 26 und der daran befestigte Rundlaufkran 25 mit Hilfe des 300-t-Portalkrans ausgebaut. Danach löst man die Befestigungsschrauben zwischen dem inneren und äusseren Teil des oberen Turbinendeckels 10, worauf die rotierenden Teile sowie die beiden Lager 6 und 8, der Abstützkonus 9 und der innere Turbinendeckel 10a mit dem Portalkran in zusammengebautem Zustand durch die Statorbohrung ausgebaut werden können.

Darauf wird der Dreieckträger 26 der Synchronmaschine wieder eingebaut. Der äussere Turbinendeckel 10b kann jetzt mit einer Spezialvorrichtung herausgehoben werden und, da sein Durchmesser grösser als die Statorbohrung ist, hängt man ihn unten an den dafür besonders ausgebildeten Dreieckträger an. Die Demontage der Leitschaufeln mit dem Portalkran ist somit möglich.

Nur die unteren Leitschaufellager 13, die unteren festen Labyrinthe 4 und der freistehende Teil 22 des Saugrohrs können ohne Gesamtdemontage nach unten ausgebaut werden. Für die Demontage der unteren Leitschaufellager 13 ist eine Teleskopvorrichtung vorgesehen. Zum Ausbau der Spaltringe 4 wird der vierteilige Saugrohrkonus 22 losgeschraubt und auf die Seite geschoben. Wegen ihrer Abmessungen können diese Teile den Raum unter der Pumpturbine nicht verlassen. Danach werden der nichtrostende Einsatzring 23 und schliesslich die Spaltringe 4 ausgebaut. Der untere Turbinendeckel kann wegen seiner Abmessungen ebenfalls nicht weggenommen werden.

Aus dieser Beschreibung ist ersichtlich, dass eine Gesamtdemontage eine lange und schwierige Operation darstellt. Diese soll deshalb nur in seltenen Fällen, zum Beispiel bei Generalüberholungen in Abständen von mindestens zehn Jahren vorgenommen werden. Dies ist vertretbar, da man angesichts der grossen Abmessungen einen Teil der Reparaturen der inneren Teile (Laufrad, Leitschaufeln, Deckelschutzwände) in der zusammengebauten Maschine ausführen kann. Aber auch die Verhältnisse bei einer Teildemontage ohne Ausbau des Läufers sind oberhalb und unterhalb der Pumpturbine wegen dem engen Platz schwierig. Erst die Praxis kann zeigen, welche Probleme sich daraus ergeben und wie diese sich auf den Betrieb und auf die Wartung der Maschine auswirken werden.

4.6. *Der Kugelschieber* (Bild 9)

Als druckseitiges Abschlussorgan wird ein Kugelschieber von 2800 mm Nennweite für einen Nenndruck von 322 m Wassersäule verwendet. Als Betriebsdichtung sowie als Notverschluss sind Dichtungsringe 3 aus nichtrostendem Stahl vorgesehen. Der Drehkörper 1 wird durch vier, direkt am Gehäuse 2 befestigte Servomotoren 4a und 4b, zwei zum Öffnen und zwei zum Schliessen, betätigt. Diese sind auf beiden Seiten des Schiebers angeordnet. Aus Sicherheitsgründen verwendet man zum Schliessen direkt anstehendes Druckwasser aus der Druckleitung, während zum Öffnen gesteuertes Drucköl dient. Alle Gelenke und Führungen des Antriebs erhalten Teflonlager. Nur die Hauptdrehzapfen werden mit Fett geschmiert, da wegen den Erschütterungen beim Anfahren diese Lösung die sicherste ist. Der Schieber ist direkt an der Druckrohrleitung angeflanscht; er erhält turbinenseitig ein Degenrohr, damit Relativbewegungen zur Spirale möglich sind. Das Gesamtgewicht des Kugelschiebers mit den Servomotoren beträgt 172 Mp. – Da keine Notverschlüsse im Oberbecken vorhanden sind, dient der Kugelschieber auch als Rohrbruchabsperrorgan. Aus diesem Grund wurde besonderer Wert auf eine robuste Ausführung gelegt.

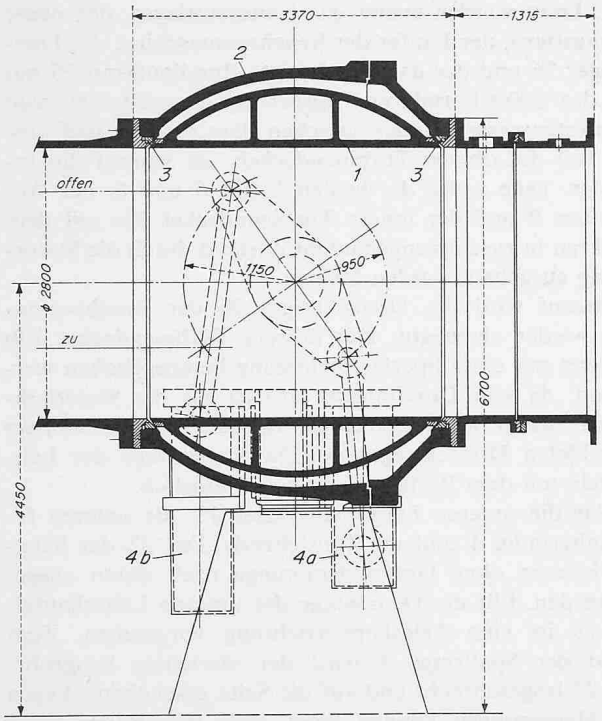


Bild 9. Schnitt durch den Kugelschieber, 1:80
1 Drehkörper
2 Gehäuse
3 Achsialverschiebbare Dichtungsringe
4a Mit Druckwasser betätigter Servomotor
4b Mit Drucköl betätigter Servomotor

5. Die elektrischen Einrichtungen

5.1. *Synchronmaschine* (Bild 10)

Die elektrische Maschine ist für folgende Hauptdaten gebaut:

Nenndrehzahl (zwei Drehrichtungen)		333,3 U/min
Durchgehdrehzahl		532 U/min
Schwungmoment (GD^2)		4700 t m²
Nennspannung		15,75 kV, 50 Hz
Nennleistung bei Generatorbetrieb	230 MVA, $\cos\varphi = 0{,}85$	
Nennleistung bei Motorbetrieb	215 MW, $\cos\varphi = 1$	
Leerlauf-Kurzschlussverhältnis		0,72
Wirkungsgrad, Generatorbetrieb bei Nennleistung	$\cos\varphi = 0{,}85$	98,68 %
Wirkungsgrad, Motorbetrieb	$\cos\varphi = 1$	98,93 %
Gesamtgewicht des Läufers		294 Mp
Läufer-Aussendurchmesser		5350 mm
Länge des Blechpakets		2500 mm
Luftspalt		25 mm
Gesamtgewicht des Ständers		180 Mp
Ständer-Aussendurchmesser		7500 mm

Wegen der grossen Abmessungen und Gewichte werden Läufer und Ständer auf der Baustelle zusammengebaut.

Der Blechkettenläufer besteht im wesentlichen aus einer hohlen Nabe 1 aus Stahlguss, die unten in die Welle übergeht, einem Radstern 2 aus Stahlblech, einem Kranz aus sektorförmigen, in passende Nuten des Radsterns eingelegten Blechen 3, sowie 18 Massivpolen 4. Über die Ausbildung der Pole und des Dämpferkreises wird im Kapitel über das elektrische Anfahren berichtet. Der Zusammenbau des Läufers erfolgt auf der Baustelle.

Der obere Führungsstern 5, welcher sich auf das Ständergehäuse 6 abstützt, dient zur Zentrierung des Läufers. Auf ihm sind das obere Führungslager 7, die Bürstenträger 9 und der Hilfsgenerator 10 angebaut. Die Brems- und Hebeböcke 11 stehen unter dem Rotor auf einer Tragbrücke 12, welche sich auf den Tragring 13 des Ständergehäuses abstützt. Die als Dreieckträger ausgebildete Brücke trägt ebenfalls den Rundlaufkran, welcher zur Demontage verschiedener Teile der Pumpturbine benötigt wird.

Wegen der vorgeschriebenen Transportmasse wird das Ständergehäuse 6 mehrteilig angeliefert und auf der Baustelle zusammengeschweisst. Es ist mit dem Tragring 13, der sein Gewicht auf das Fundament überträgt, fest verschraubt. Die Konstruktion ist jedoch genügend elastisch, um die im Betrieb zu erwartenden Wärmedehnungen aufzunehmen. Das Schichten des Blechpakets und der Einbau der Wicklungsstäbe werden auf der Baustelle vorgenommen. Die Isolierung der Ständerwicklung wird aus Glimmer und Epoxidharz hergestellt, unter Vakuum getränkt und thermisch gehärtet. Die Ständerwicklung besteht aus drei parallel geschalteten Stromkreisen, das heisst aus neun Leitern, die einerseits mit den drei Generatorklemmen, anderseits mit dem isolierten Nullpunkt verbunden sind. Der letztgenannte befindet sich in unmittelbarer Nähe der Maschine und erhält die für die Messung, die Zählung und den Schutz notwendigen Strom- und Spannungswandler. Wegen des Selbstanlaufs der Maschine wurde besonderer Wert auf eine kräftige Konstruktion der Wickelköpfe gelegt. Die Leiter sind miteinander hartverlötet, während eine ausreichende Versteifung durch reichlich bemessene Distanzstücke und Stützen erzielt wird.

Die Synchronmaschine wird mit Fremdlüftern in geschlossenem Kreislauf luftgekühlt. Die Warmluft kühlt sich in den aussen am Ständer angeflanschten, mit Wasser durchströmten Kühlern ab.

Zur Erregung dient ein über der Synchronmaschine angeordneter Hilfsgenerator 10. Der Erregerstrom wird in einem Thyristorgerät gleichgerichtet und geregelt.

5.2. *Hauptstromkreis* (Bild 11)

Vom Motorgenerator übertragen gekapselte Aluminiumschienen die Energie auf den Transformator. Diese Schienen gehen von den 15,75-kV-Klemmen aus, steigen senkrecht entlang der äusseren Schachtwand auf und erreichen den Transformator über ein Schalthaus, in welchem der Bremstrenner, die Anfahrdrossel mit ihren Kurzschliessern sowie sämtliche 15,75 kV-Spannungswandler aufgestellt sind. Alle diese Geräte werden mit vollständig getrennten Phasen und, wo möglich, mit einer geerdeten, konzentrischen Kapselung ausgeführt. Diese Bauweise gewährt grösste Sicherheit gegen Kurzschluss- und Unfallgefahren.

Ein 230-MVA-Drehstromtransformator verbindet die Maschine mit dem 220-kV-Netz. Diese Lösung wurde wegen preislicher und räumlicher Vorteile einer Anordnung mit Einphasentransformatoren vorgezogen.

Die 220-kV-Freiluftanlage liegt teilweise über dem 15-kV-Schalthaus, teilweise auf einem daneben, südlich des Kraftwerkschachts liegenden flachen Gelände 8 (Bild 6). Wegen der allgemeinen Platzknappheit wurde eine möglichst raumsparende Bauweise angestrebt. In der Anlage werden der Maschinenschalter, die Phasenumkehrtrenner sowie die 220-kV-Wandler und -Ableiter aufgestellt. Eine 220-kV-Einzelleitung verbindet die Schaltanlage mit dem Netz der Rhein.-Westf. Elektrizitätswerke (RWE). Ohne Trenner wird diese am nächstliegenden Mast am Luxemburger Ufer der Our mit einem System der beiden Doppelleitungen, welche das Kraftwerk Vianden I mit dem Netz verbinden, zusammengeschaltet. Die Verlegung von Einphasen-Ölkabeln in einem Tunnel zwischen der 10. Ma-

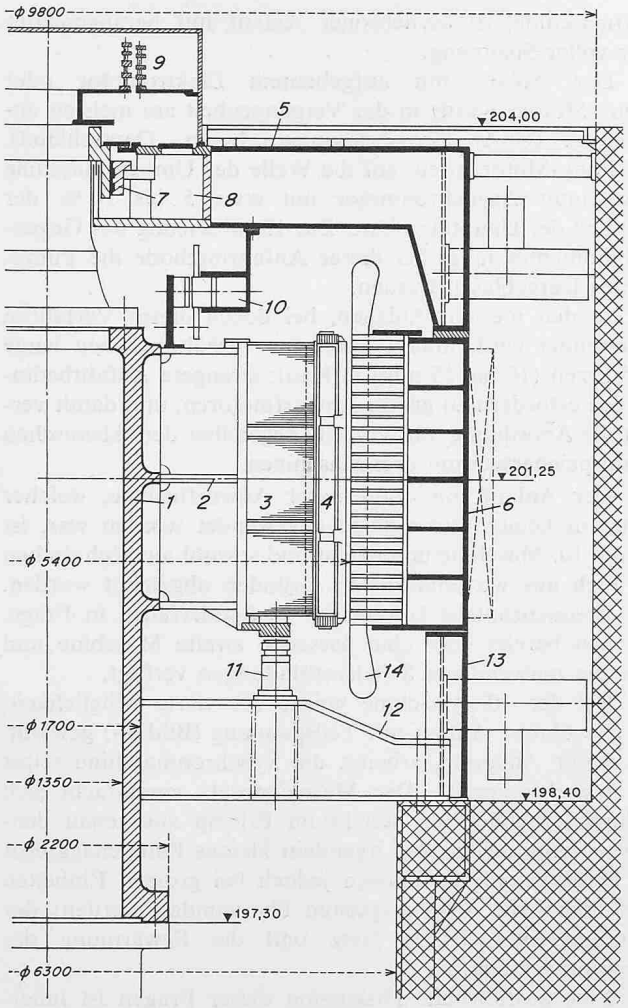


Bild 10. Längsschnitt durch die Synchronmaschine, 1:70

1	Nabe	8	Ölbehälter zu 7
2	Radstern	9	Bürstenträger
3	Rotorbleche	10	Hilfsgenerator
4	Massivpole	11	Brems- und Hebeböcke
5	Oberer Führungsstern	12	Tragbrücke
6	Ständergehäuse	13	Tragring zu 6
7	Oberes Führungslager	14	Ständerwicklung

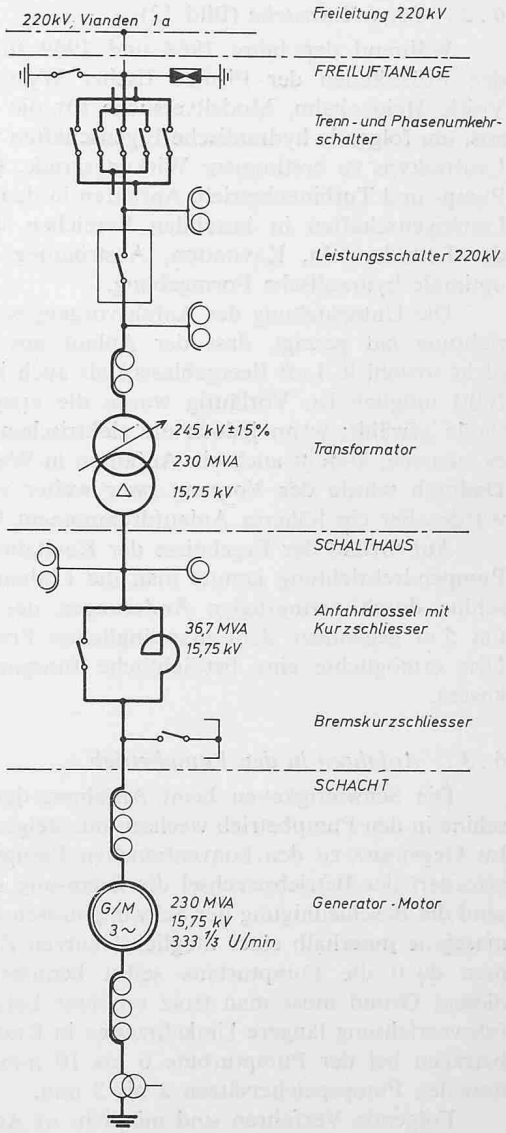


Bild 11. Einpolige Darstellung des Hauptstromkreises der 10. Maschine

schine und der Zentrale Vianden I wurde trotz verschiedener technischer Vorteile wegen zu hohen Kosten abgelehnt.

6. Besondere Probleme der Umkehrmaschinen

Ehe wir zur weiteren Beschreibung der Einrichtungen der 10. Maschine übergehen, sollen die zwei kritischsten Probleme der Umkehrmaschinen näher erläutert werden. Diese sind:

- die hydraulische Formgebung, insbesondere zur Vermeidung unzulässiger Kavitationsschäden im Pumpbetrieb,
- das Anfahren der Maschine vom Turbinen- in den Pumpbetrieb.

6.1. Hydraulische Bemessung der Pumpturbine

Bei Fallhöhen zwischen 200 und 350 m können Pumpturbinen in erster Annäherung als Pumpen betrachtet werden, die für den Turbinenbetrieb mit einem beweglichen Leitapparat ausgerüstet sind. Bei einer reinen Pumpe jedoch kann die Kavitationsgefahr durch die zwei- oder mehrstufige Bauweise leichter beherrscht werden, wogegen der Turbinenbetrieb eine einstufige Maschine erfordert. Daher muss man die Maschine erheblich tiefer einbauen, um eine genügende Laufruhe zu erhalten (Vianden I: Kote 207 m; 10. Maschine: Kote 193 m). Ausserdem unterliegen die Leitschaufeln beim Pumpbetrieb und insbesondere beim Anfahren starken Schwingungen. Ihre hydraulische und mechanische Bemessung wurde daher auf Grund ausführlicher Versuche festgelegt.

Die günstigsten hydraulischen Verhältnisse im Turbinen- und im Pumpbetrieb entsprechen zwei verschiedenen Drehzahlen. Wenn die Konstruktion der Synchronmaschine nur eine Drehzahl zulässt, muss man daher eine Wirkungsgradeinbusse von 1 bis 2 % gegenüber konventionellen Maschinen in Kauf nehmen. Diese verlagert sich je nach Wahl des Arbeitspunktes auf den Turbinen- oder auf den Pumpbetrieb.

Das Verhältnis der Pumpenleistung zur Turbinenleistung ist nicht mehr wie bei Maschinensätzen mit getrennten Pumpen frei wählbar. Es schwankt etwa zwischen 0,8 und 1,2 und kann durch folgende Faktoren beeinflusst werden: a) hydraulische Form des Laufrads, b) bei gegebenem Laufradtyp, Verschiebung des Arbeitspunktes durch die Wahl der Drehzahl und des Raddurchmessers, c) Begrenzung der Leitradöffnung im Turbinenbetrieb. Im Falle Vianden wählte man das genannte Verhältnis zu 1,1, welches den heutigen Netzverhältnissen Rechnung trägt.

6.2. *Modellversuche* (Bild 12)

Während der Jahre 1968 und 1969 führte man auf den Prüfständen der Firmen Escher Wyss, Zürich, und Voith, Heidenheim, Modellversuche für die 10. Maschine aus, um folgende hydraulische Eigenschaften des gewählten Laufradtyps zu bestimmen: Wirkungsgrade, Kennlinien im Pump- und Turbinenbetrieb, Anfahren in den Pumpbetrieb, Laufeigenschaften in instabilen Bereichen, Schwingungen der Leitschaufeln, Kavitation, Abströmung im Saugrohr, optimale hydraulische Formgebung.

Die Untersuchung des Anfahrvorganges in Pumpdrehrichtung hat gezeigt, dass der Anlauf aus hydraulischer Sicht sowohl in Luft (leergeblasen) als auch in Wasser (gefüllt) möglich ist. Vorläufig wurde die erstgenannte Methode gewählt; wenn jedoch die elektrischen Bedingungen es zulassen, kommt auch ein Anfahren in Wasser in Frage. Dadurch würde der Vorgang zwar weiter vereinfacht, es würde aber ein höheres Anlaufdrehmoment benötigt.

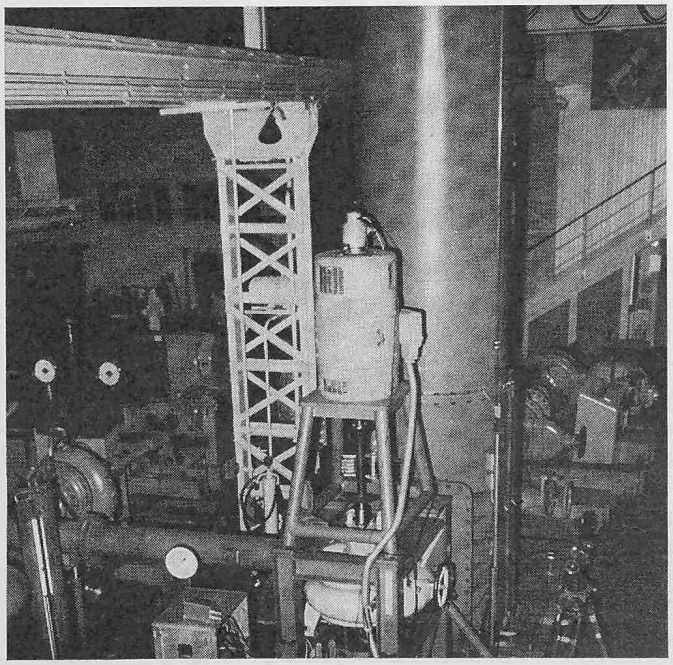
Auf Grund der Ergebnisse der Kavitationsversuche in Pumpendrehrichtung konnte man die Einbaukote der Maschine durch geringfügige Änderungen der Laufradform um 5 m gegenüber dem ursprünglichen Projekt erhöhen. Dies ermöglichte eine beträchtliche Einsparung an Baukosten.

6.3. *Anfahren in den Pumpbetrieb*

Die Schwierigkeiten beim Anfahren der Umkehrmaschine in den Pumpbetrieb wachsen mit steigender Leistung. Im Gegensatz zu den konventionellen Pumpspeichersätzen erfordert der Betriebswechsel die Bremsung und anschliessend die Beschleunigung der Schwungmassen der Synchronmaschine innerhalb einer möglichst kurzen Zeit, ohne dass man dazu die Pumpturbine selbst benutzen kann. Aus diesem Grund muss man trotz erhöhter Leistung der Anfahrvorrichtung längere Umkehrzeiten in Kauf nehmen; sie betragen bei der Pumpturbine 6 bis 10 min, bei konventionellen Pumpspeichersätzen 2 bis 3 min.

Folgende Verfahren sind möglich: a) Anlauf mit aufgebautem Anwurfmotor, b) Anlauf mit aufgebauter Anwurfturbine, c) Frequenzanlauf durch eine andere Wasserkraftmaschine, d) asynchroner Anlauf mit herabgesetzter oder voller Spannung.

Bild 12. Ansicht des Pumpturbinenmodells der 10. Maschine während der Versuche im Probestand von Escher Wyss AG in Zürich



Der Anlauf mit aufgebautem Elektromotor oder «Pony-Motor» wurde in der Vergangenheit am meisten angewendet (USA, Grossbritannien, Japan, Deutschland). Der Pony-Motor ist ein auf die Welle der Umkehrmaschine aufgebauter Asynchronmotor mit etwa 5 bis 10 % der Leistung der Hauptmaschine. Zur Herabsetzung des Gegendrehmomentes muss bei dieser Anfahrmethode die Pumpturbine leergeblasen werden.

In den meisten Anlagen, bei denen dieses Verfahren angewendet wird, nimmt man eine verhältnismässig lange Anfahrzeit (10 bis 15 min) in Kauf; strengere Anfahrbedingungen erfordern zu grosse Anwurfmotoren, und damit verliert die Anordnung alle Vorteile gegenüber dem klassischen Pumpspeichersatz mit drei Maschinen.

Der Anlauf mit aufgebauter Anwurfturbine, welcher bisher in keiner Grossanlage angewendet worden war, ist für die 10. Maschine untersucht und sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen abgelehnt worden. Der Frequenzanlauf kommt nur in Sonderfällen in Frage, wo man bereits über eine passende zweite Maschine und über die notwendigen Schaltverbindungen verfügt.

Bei der 10. Maschine wurde die vierte Möglichkeit, der *asynchrone* Anlauf mit Teilspannung (Bild 13) gewählt. Bei dieser Anlaufart arbeitet die Synchronmaschine selbst als Asynchronmotor. Der Maschinensatz vereinfacht sich dadurch erheblich, er besteht im Prinzip aus genau denselben Bestandteilen wie irgendein kleines Pumpenaggregat für Direktanlauf. Es müssen jedoch bei grossen Einheiten zwei erhebliche Schwierigkeiten überwunden werden: der Spannungseinbruch im Netz und die Erwärmung der Dämpferwicklung.

Eine ausführliche Diskussion dieser Fragen ist innerhalb dieses Aufsatzes nicht möglich. In den folgenden Abschnitten wird lediglich die hier gewählte Lösung kurz umrissen: Um den *Spannungseinbruch* im 220-kV-Netz auf den vorgeschriebenen Höchstwert von 3 % zu begrenzen, schaltet man während des Hochlaufs eine Drossel zwischen die elektrische Maschine und den Transformator. Nach der Synchronisierung, die man durch einfaches Zuschalten der Erregung erreicht, wird diese Drossel kurzgeschlossen. Zur Herabsetzung des Gegendrehmomentes wird die Pumpturbine während des Anlaufvorganges leergeblasen.

Anstelle der Dämpferwicklung verwendet man Massivpole mit flexiblen Polverbindungen. Diese Verbindungen erhalten einen grossen Querschnitt und werden auf die Polschuhe hart aufgelötet. Die richtige Bemessung der Massivpole wurde durch ein an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne entwickeltes Rechenprogramm ermöglicht.

Durch Längsrillen der Polschuhe, welche einen Stromfluss direkt an der Oberfläche der Pole verhindern, erhält man eine bessere Eindringtiefe des Stroms und eine erhöhte Kühlwirkung. Dadurch gelingt es, die Erwärmung beim Anlauf unter 250 °C zu halten. Schrägschlitze in Umlaufrichtung erleichtern die Wärmedehnung der Pole.

Nach dem Kurzschliessen der Drossel füllt man die Pumpturbine gleichzeitig von der Saugseite und vom Oberwasser her. Dazu strömt Druckwasser durch zwei Fülleitungen bei geschlossenem Kugelschieber in die Spirale der Pumpturbine und von dort zum Laufrad über den leicht geöffneten Leitapparat. Das hierdurch komprimierte Luftpolster entweicht anschliessend durch eine Entlüftung in der Laufradnabe. Danach wird die Pumpturbine durch gleichzeitiges Öffnen des Leitrads und des Kugelschiebers auf Förderung gebracht.

Die Maschine und die Anfahrvorrichtung sind so bemessen, dass später, wenn die Bedingungen des Netzes es erlauben, auf einen Direktanlauf mit voller Spannung und gefüllter Pumpturbine übergegangen werden kann. Dadurch lässt sich der Anlaufvorgang noch erheblich vereinfachen. Diese Anfahrmethode wurde bisher nur bei Maschinen mittlerer Leistung (bis 50 MW), vor allem in der Schweiz und in Japan, mit Erfolg angewendet.

6.4. *Elektrische Bremsung*

Bei direktem Übergang vom Generator- auf den Pumpbetrieb muss die Maschine bei konstanter Erregung durch Kurzschliessen der Wicklung gebremst werden. Das Bremsmoment entsteht durch Umwandlung der kinetischen Energie in ohmsche Verluste im Ständer. Ein zweites Moment, das durch die hydraulischen Verluste im gefüllten Laufrad entsteht, addiert sich zum ersten und erhöht die Bremswirkung.

6.5. *Umkehrzeit* (Bild 14)

Bei der hier beschriebenen Brems- und Anfahrweise lässt sich die Schaltzeit von Turbinenbetrieb mit voller Leistung auf Pumpbetrieb auf weniger als 5½ min herabsetzen (Vianden I: 2 bis 3 min). Diese Zeitspanne kann bei Direktanlauf mit voller Spannung noch um etwa eine Minute verringert werden.

7. Hilfseinrichtungen

Die wichtigsten elektrischen und mechanischen Hilfseinrichtungen des Maschinensatzes befinden sich im Maschinenschacht und in dessen unmittelbarer Nähe. Vor der Beschreibung dieser Anlagen ist es zweckmässig, einen Überblick über die dazu geschaffenen Räume und die dort vorgesehenen Hebegeräte zu geben.

7.1. *Inneneinrichtung des Kraftwerkschachts und des Aussengebäudes* (Bild 15)

Die notwendigen Montageplätze und Betriebsräume befinden sich zum Teil im Schacht, zum Teil in einer grossen darüber gebauten Montagehalle. Der Schacht wird durch eine senkrechte Mauer in zwei ungleiche Räume geteilt. Der südliche Teil, der etwa fünf Sechstel des Querschnittes umfasst, dient zum Aufstellen der Fundamente des Maschinensatzes mit Saugkrümmer und Kugelschieber. Mit Ausnahme des oberen Wellenteiles mit den Schleif-

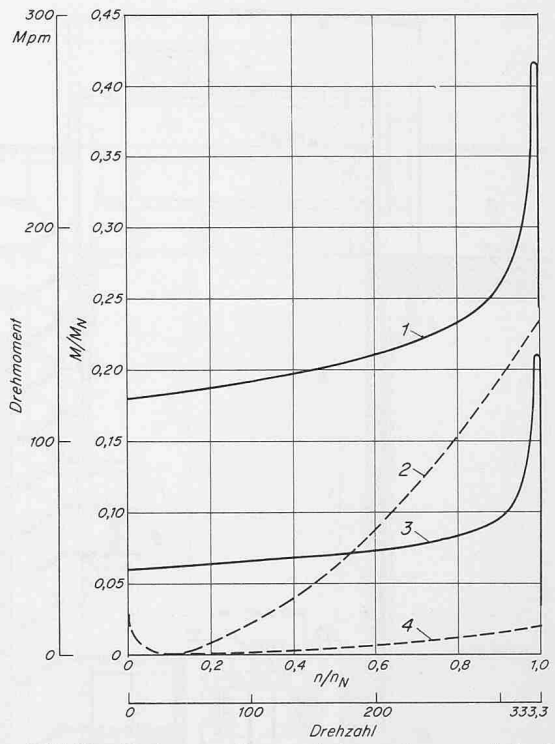
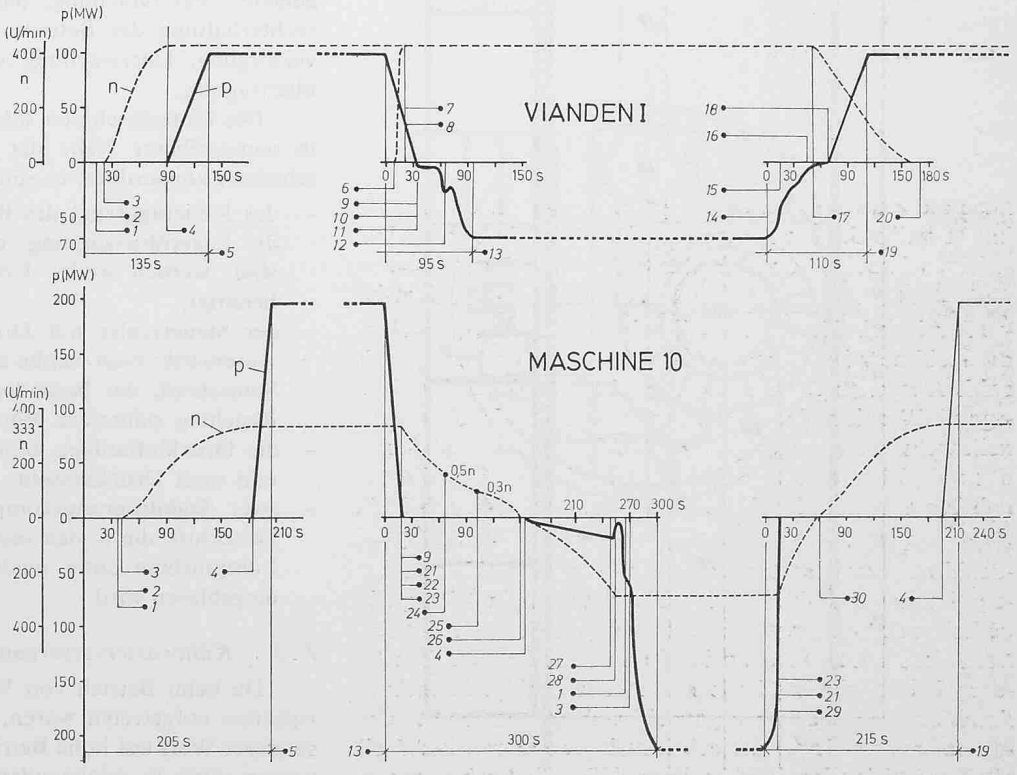


Bild 13. Drehmomentkurven bei asynchronem Anlauf
1 Motordrehmoment bei Direktanlauf
2 Lastdrehmoment bei gefüllter Turbine
3 Motordrehmoment bei Anlauf mit Drosselspule
4 Lastdrehmoment bei leergeblasener Turbine

Bild 14. Gegenüberstellung der Betriebsänderungsdiagramme der Anlagen Vianden I und 10. Maschine



1 Kugelschieber öffnet
2 Spirale gefüllt
3 Leitrad öffnet
4 Leistungsschalter ein
5 Stillstand – Vollast – Turbine
6 Pumpenanlauf
7 Kuppeln
8 Entlüften und Füllen
9 Turbine entlastet
10 Verriegelung Leitrad
11 Turbine – Kugelschieber schliesst
12 Pumpe – Kugelschieber öffnet
13 Vollast (Turbine) – Vollast (Pumpe)
14 Pumpe – Kugelschieber schliesst
15 Pumpe leerblasen
16 Turbine – Kugelschieber öffnet
17 Auskuppeln
18 Leitrad entriegelt
19 Vollast (Pumpe) – Vollast (Turbine)
20 Pumpenstillstand
21 Leistungsschalter aus
22 Anfahrdrossel ein
23 Phasenumschaltung
24 Elektrische Bremsung ein
25 Laufrad leerblasen
26 Elektrische Bremsung aus
27 Synchronisieren, Anfahrdrossel aus
28 Füllen des Laufrades
29 Teilentlastung Pumpe
30 Leitapparat in Leerlaufstellung

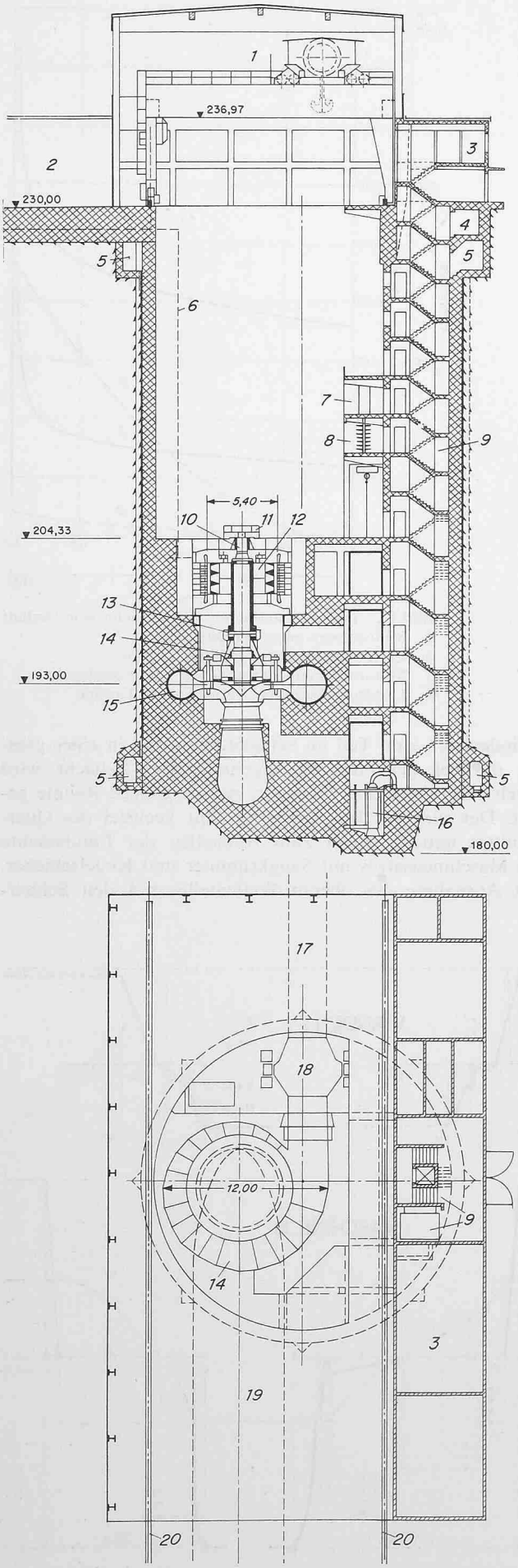


Bild 15. Schachtkraftwerk und Montagehalle, Vertikalschnitt und Grundriss 1:500

Legende zu Bild 15 (links):

1	300-t-Portalkran	11	Bürstenträger
2	15,75-kV-Schalthaus	12	Generator
3	Betriebsgebäude	13	Spurlager
4	Kabelgang	14	Unteres Führungslager
5	Drainage-Kontrollgang	15	200-MW-Pumpturbine
6	Gekapselte Stromschienen	16	Lenzpumpe
7	Podeste für Schalttafeln	17	Druckstollen
8	Kabelgang	18	Kugelschieber
9	Treppenhaus und Fahrstühle	19	Unterwasserstollen
10	Oberes Führungslager	20	Kranbahnschienen

ringen der elektrischen Maschine befindet sich der Maschinensatz ganz unterhalb des Montagepodiums (Kote 204,33). Der Raum über diesem Podium bleibt frei und kann mit dem in der Halle aufgestellten Portalkran 1 bedient werden. In den tiefer liegenden Räumen sind die direkt an die Maschine gebundenen elektrischen und mechanischen Hilfseinrichtungen auf vier Etagen rings um die Fundamente verteilt angeordnet.

Im nördlichen Teil des Bauwerkes, dem «Bedienungsschacht», sind die Treppen, der Personenaufzug, der 5-t-Lastenaufzug sowie Kabel- und Belüftungsschächte untergebracht. Die Steuer-, Bedienungs- und Verteiltafeln werden auf einem auf Kote 213,90 an den Bedienungsschacht angebauten Balkon aufgestellt. Ein zweiter Balkon gleicher Breite auf Kote 210,90 dient als Kabelboden.

Der Portalkran stützt sich einerseits auf die Schachttrennwand, anderseits auf eine im Fels verankerte, tangential zum Schacht verlaufende Schiene. Die Kranbahn, die so eine Spurweite von 18 m erhält, wird aussen auf den Hallenvorplatz in Richtung Auslaufbauwerk verlängert. Ausser der Hauptkatze von 300 t mit einer maximalen Hubgeschwindigkeit von 4 m/min ist der Kran mit einem Hilfshubwerk von 16 t ausgerüstet.

7.2. *Mechanische Hilfseinrichtungen*

Bei der Projektierung der mechanischen Nebeneinrichtungen waren folgende Gesichtspunkte zu beachten: weitgehende Vereinfachung, möglichst leichte Wartung, Aufrechterhaltung des Betriebs bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung, Überwachung und Befehlsgabe mittels Fernübertragung.

Die Hilfsmaschinen sind auf den drei unteren Etagen, in unmittelbarer Nähe der Pumpturbine und des Kugelschiebers angeordnet; es sind das:

- das Steueraggregat des Kugelschiebers;
- die Lagerölversorgung; da alle Lager selbstschmierend sind, werden weder Umwälzpumpen noch Ölbehälter benötigt;
- der Steuerregler mit Druckölanlage und hydraulischer Automatik; man wählte einen Regler mit elektronischem Steuerkopf, der besonders bei der Leistungs-Frequenz-Regelung zahlreiche Vorteile bietet;
- die Druckluftanlage, bestehend aus zwei Kompressoren und zwei Druckkesseln;
- zwei Stabilisierungskompressoren zur Erzeugung der Druckluft, die in den instabilen Strömungsbereichen der Pumpturbine unter niedrigem Druck in das Saugrohr eingeblasen wird.

7.3. *Kühlwasserversorgung und Lenzpumpen*

Da beim Betrieb von Vianden I verschiedene Schwierigkeiten aufgetreten waren, wurde bei diesen Anlagen besonderer Wert auf hohe Betriebssicherheit gelegt. Das Kühlwasser wird in genügender Entfernung des Auslaufbauwerks dem Unterbecken in einem zylinderförmigen Turm entnommen. In diesem Bauwerk sind zwei Tauchpumpen

von je 70 l/s vorgesehen, welche das Wasser in einen Hochbehälter von 270 m³ am «Bildchen»-Hang fördern. Vor diesem Behälter wird das Wasser in einer leicht zugänglichen, wartungsarmen Trommel-Siebmaschine filtriert, fliesst dann den Verbrauchern zu und von diesen mit natürlichem Gefälle ins Unterwasser. Die wichtigsten Verbraucher sind die Generatorkühler, die Lagerölkühler, die Druckluftkompressoren und die Stabilisierungskompressoren.

Für das Lenzwasser sind im tiefsten Punkt des Schachts vier Tauchpumpen vorgesehen, welche je 80 l/s fördern. Neben der normalen Wasserhaltung des Schachts sollen diese auch die Entleerung des Saugkanals und des unteren Teils der Druckrohrleitung in einer vertretbaren Zeit ermöglichen und einen gewissen Schutz gegen Wassereinbrüche gewähren. Bei Eigenbedarfsausfällen übernimmt ein Ejektor zeitweilig die Aufgabe dieser Pumpen, dessen Betriebswasser der Druckrohrleitung entnommen wird.

7.4. *Elektrische Hilfseinrichtungen*

Diese Einrichtungen werden zum Teil auf der Generatoretage direkt unter dem Montagepodium, zum Teil auf dem als «Leitstand» vorgesehenen Balkon, zum Teil in den oberen Etagen des Bedienungsschachts und in den Betriebsräumen der Halle aufgestellt. Ihre Wirkungsweise wird vor allem durch die Fernbedienung und Fernüberwachung des Kraftwerks von Vianden I aus bestimmt. Folgende Betriebsarten sind möglich: Fernsteuerung von Vianden I (normaler Betrieb), automatischer Betrieb mit örtlicher Überwachung und Steuerung (bei Ausfall der Fernsteuerung), halbautomatischer Betrieb mit örtlich getrennter Wahl der einzelnen Schaltfolgen, mechanischer Handbetrieb vor Ort. Die beiden letztgenannten Betriebsarten kommen hauptsächlich bei der Inbetriebnahme, bei Versuchen oder Störungen der Automatik zur Anwendung.

Die elektrischen Hilfseinrichtungen setzen sich aus folgenden Teilen zusammen:

- die Erregung und Spannungsregelung sowie die Sternpunktzelle des Generatormotors (Generatoretage)
- die Automatik sowie die Steuertafeln mit Überwachungsgeräten und Generatorschutz (Leitstand); da kein Bedienungspersonal an Ort und Stelle vorgesehen ist, werden wartungsfreie, vorwiegend elektronische Bauelemente verwendet. Dank der schnellen Fortschritte der Technik sowohl auf dem Gebiet der festverdrahteten Logik wie der Kleinrechner sind heute betriebssichere und erprobte Lösungen möglich, die der letzten Entwicklung Rechnung tragen
- die Fernsteuerung und Fernmessung für die Übertragung aller Befehle und Meldungen zwischen der Schaltwarte Vianden I und dem neuen Kraftwerk; dazu werden die beiden Kraftwerke mit Fernsprechkabeln verbunden;
- die Eigenbedarfsversorgung (6-kV-Verteilung), die in die Kabelverbindung Lohmühle-Vianden I eingeschleift wird; sie erhält zusätzlich eine Hilfseinspeisung vom Oberbecken; zusammen mit den beiden 1000-kVA-Transformatoren für 6/0,4-kV wird die 6-kV-Anlage in den Betriebsräumen der Kraftwerkhalle untergebracht.
- die Niederspannungs-, Gleichstrom- und Notstromverteilungen mit den dazugehörenden Gleichrichtern, Batterien und Wechselrichtern; sie werden in verschiedenen Räumen der Halle des Kraftwerkschachts, möglichst nahe an den Verbrauchern aufgestellt.

7.5. *Belüftung, Heizung, Brandschutz*

Die Belüftung des Kraftwerkschachts erfolgt zum Teil durch Frischluft, zum Teil in geschlossenem Kreislauf. Die Frischluft wird zwar vorgewärmt, jedoch decken die Verluste des Maschinensatzes und der Nebenanlagen den grössten Teil des Wärmebedarfs. Nur der Leitstand und einige andere Räume mit elektrischen Apparaten werden teilklimatisiert. Im Betriebsgebäude und in der Montagehalle sind elektrische Direktheizungen aufgestellt.

Der Maschinentransformator und der vertikale Kabelschacht im Bedienungsschacht werden durch automatische Wassersprühflutanlagen gegen Brand geschützt. Ausserdem hat man in allen gefährdeten Anlageteilen Rauchmelder aufgestellt, deren Ansprechen das Auslösen einer Meldung, das Schliessen von Schutzklappen in den Belüftungskanälen und die Betätigung der Sprinkleranlagen zur Folge hat.

8. Vorgesehene Betriebsweise

8.1. *Massnahmen*

Wie bereits erwähnt, bildete die Fernbedienung und die Automatisierung der Anlage einen wesentlichen Gesichtspunkt bei der Projektierung. Zusammenfassend weisen wir erneut auf die wichtigsten Massnahmen hin, die für diese Betriebsweise erforderlich sind:

- Selbstschmierende Maschinenlager,
- Entfallen der Fettschmierung durch weitgehende Teflonierung des Leitapparats und des Kugelschieberantriebs,
- Verwendung von Dichtungen und Manschetten mit langer Lebensdauer,
- Nichtrostende Ausführung aller Bauteile, die durch Kavitation oder Korrosion gefährdet sind,
- Weitgehende Vereinfachung der Hilfsbetriebe durch die Bauart der Maschine und die gewählte Anfahrmethode,
- Meldung, Registrierung und Fernanzeige aller möglichen Fehler und Störungen durch eine ausgedehnte und wirksame Überwachungseinrichtung,
- Allgemeiner Übergang zu elektronischen Bauelementen.

Eine Studie zur Anschaffung eines Prozessrechners in Vianden I zur Datenverarbeitung der gesamten Kraftwerkgruppe ist in Arbeit. Es ist zweckmässig, im neuen Kraftwerk bereits jetzt alle Geber zum Anschluss an den Rechner über die Fernübertragung vorzusehen. Angesichts der Vielseitigkeit der Aufgaben versprechen wir uns von der Datenverarbeitung zahlreiche betriebliche und organisatorische Vorteile.

8.2. *Laufende Überholungsarbeiten*

Obwohl das Kraftwerk normalerweise nicht besetzt ist, muss für den Ein- und Ausbau und das Ablegen der verschiedenen Schwerteile sowie für die Wartungs- und Reparaturarbeiten genügend Platz verfügbar sein. Diese Arbeiten und Kontrollen werden in mehrjährigen Abständen ausgeführt, die je nach den auftretenden Fehlern später festgelegt werden. Die normalerweise zur Verfügung stehenden Reparaturtermine reichen erfahrungsgemäss nicht aus, um alle Teile zur Hauptwerkstatt zu transportieren, die sich am Eingang des Kraftkwerks Vianden I befindet. Es ist daher unbedingt notwendig, an Ort und Stelle alle für diese Arbeiten notwendigen Montageplätze, Hebevorrichtungen und Hilfswerkstätten zu schaffen.

Im Schachtkraftwerk wird eine kleine Werkstätte neben dem Montagepodium in einem Raum des Bedienungsschachtes eingebaut. Diese Werkstatt sowie die auf den unteren Etagen eingebauten Hilfseinrichtungen sind durch eine unter dem unteren Balkon angebrachte Laufkatze zugänglich. Da die Fläche des unteren Montagepodiums bei einer Gesamtdemontage zum Abstellen aller Maschinenteile nicht ausreicht, sind ausserdem in der Halle zwei gedeckte

Montageplätze auf beiden Seiten des Schachts und vor der Halle ein Abladeplatz im Freien vorgesehen. Alle diese Montageflächen liegen im Bereich des 300-t-Portalkrans. Eine zweite Werkstätte und ein Lager befinden sich auf gleicher Höhe im Betriebsgebäude der Kraftwerkhalle.

9. Baukosten, Termine, Vergebungen

Auf der Grundlage der Preise und Löhne Anfang 1970 wurde für die gesamten Baukosten der 10. Maschine ein Kostenvoranschlag von 800 Mio Luxemburger Franken (etwa 70 Mio SF) aufgestellt. Diese Summe verteilt sich etwa folgendermassen:

– Bauarbeiten	29 %
– Stahlwasserbauten	11,5 %
– Hydromechanische Ausrüstung	21,5 %
– Elektrische Ausrüstung	22 %
– Projektierung, Geländekäufe, Steuern, Verschiedenes	16 %

Die Projektierung und Bauleitung wurde von einer Arbeitsgemeinschaft der beiden Ingenieurbüros Lahmeyer AG, Frankfurt (Main), und Société Générale pour l'Industrie (SGI), Cointrin (Genf), übernommen. Die eigentlichen Bauarbeiten haben am 1. März 1970 begonnen. Verschiedene Vorbereitungsarbeiten waren zu diesem Zeitpunkt bereits ausgeführt. Die Bauzeit ist auf drei Jahre festgelegt worden; voraussichtlich wird die Anlage 1973 in Betrieb gehen.

Folgende Grossaufträge sind bis Anfang 1971 erteilt:

Bauarbeiten: Arbeitsgemeinschaft: Société des Entreprises de Travaux Publiques André Borie, Paris; Heinrich Lenhard KG, Saarbrücken

Druckschachtpanzerung: Vereinigte Österreichische Stahl- und Eisenwerke (Vöest) AG, Linz/Österreich

Kraftwerkhalle, Metallkonstruktion: Société des Anciens Ateliers de Constructions Métalliques Barblé S. A., Strassen/Luxemburg

Pumpturbine, Hilfsaggregate und hydraulische Steuerung: Arbeitsgemeinschaft Escher Wyss GmbH, Ravensburg, und J. M. Voith GmbH, Heidenheim

Elektrische Maschine mit Erregereinrichtung: Arbeitsgemeinschaft Brown Boveri AG, Mannheim, Siemens AG, Berlin/München

Kugelschieber: Neyrpic, Constructions Hydrauliques et Mécaniques, Grenoble

Gekapselte Stromschienen: Société Industrielle de Matériel Electrique (SIMEL), Gevrey-Chambertin/Frankreich

15,75-kV-Schaltgeräte: Brown Boveri AG, Mannheim

Transformator: Italtrafo (Breda), Milano

Unterwasserschützen: Vereinigte Österreichische Stahl- und Eisenwerke (Vöest) AG, Linz/Österreich

300-t-Portalkran: Munck International, Bergen/Norwegen

10. Schlussfolgerungen

Wie bereits zu Beginn erwähnt, kann die 10. Maschine aus zahlreichen Gründen als eine einzigartige technische Leistung angesehen werden. Die wichtigsten sind: die grosse Leistung der Pumpturbine, das Anfahrprinzip, die Betriebsweise, die Fernsteuerung und die Automatisierung. Weiter lässt sich bereits jetzt anhand der Liste der beteiligten Unternehmen, Firmen und Ingenieurbüros feststellen, dass die 10. Maschine – wie bereits Vianden I – ein Werk europäischer Zusammenarbeit darstellt. Ingenieure, Fachleute und Arbeiter aus einer grossen Zahl von Ländern nehmen daran teil, und die Technik schreitet dadurch auf zahlreichen Gebieten weiter fort.

Schliesslich sei auf die entscheidende Bedeutung aufmerksam gemacht, die der Auswertung der Betriebserfahrungen von Vianden I zukommt. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit und zur Erleichterung der Wartung des späteren Kraftwerks wurden eine Reihe zusätzlicher Investierungen beschlossen, deren Ausmass die Arbeitsbedingungen und letzten Endes die Verfügbarkeit der Anlage weitgehend beeinflussen. Wir sind überzeugt, dass die Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte entscheidend zum Erfolg des neuen Maschinensatzes beitragen werden.

Hubschrauber – Arbeitspferde der Moderne

DK 629.135.4:656.7

1. Überblick

Fast 500 Jahre sind vergangen, seit Leonardo da Vinci einen rotierenden, spiralförmigen Flügel entworfen hat, der sich zumindest in der Theorie seinen Weg in die Luft bohren konnte. 66 Jahre sind es her, seit die Gebrüder Wright den ersten Flug mit festen Tragflächen meisterten. Und etwas mehr als dreissig Jahre sind verstrichen, seit *Igor I. Sikorsky* am 14. September 1939 in Stratford von einem Hubschrauber in die Luft getragen wurde, dessen dreiflügeliger Rotor von einem 75-PS-Motor mit Hilfe eines komplizierten Riemensystems angetrieben wurde. Doch blieb der Hubschrauber während dieser ganzen Entwicklungszeit ein teures Vehikel, etwas am Rande der Fliegerwelt. Dies scheint sich nun zu ändern. Der zivile Markt lässt Anzeichen einer Expansion erkennen. Drei kürzlich erteilte Aufträge dürften Vorboten des von der Industrie erhofften Aufschwunges sein:

- Die Okanagan Helicopters Ltd., Vancouver, kaufte 30 neue FH-1100 von der Fairchild Hiller Corp. Okanagan unterhält eine Flotte von 60 Hubschraubern für den Bau von Überlandleitungen, für geologische Untersuchungen sowie für Schutzmassnahmen in der Forst- und Landwirtschaft.
- Die Petroleum Helicopter Inc., Lafayette, deren über 140 Maschinen die grösste gewerbliche Hubschrauberflotte der Welt darstellen, kaufte für 2,5 Mio $ 21 Maschinen von der Bell Helicopter Co.
- Die mit der Erforschung von Ölvorkommen und Ölbohrungen im Süden der USA und in Alaska beschäftigte Houstoner Firma Rowan Drilling Co. hat die ersten beiden kommerziellen Ausführungen des Sikorsky-«Skycrane» gekauft, die je 2 Mio $ kosten.

Sein Überleben und seine Anerkennung verdankt der Hubschrauber zweifellos dem Militär. Der Bestand an militärisch verwendeten Hubschraubern hat sich in drei Jahren verdoppelt und die Zahl von 10000 Stück bereits überschritten. Auf dem zivilen Markt ist man zuversichtlich, dass der Hubschrauber innerhalb des nächsten Jahrzehntes in einer Reihe von zivilen Aufgaben zur Geltung gelangen wird. Man rechnet damit, dass er zu einem Beförderungsmittel für Geschäftsleute wird, und dass man ihn mehr als bisher einsetzt, um Fracht und Menschen zu schwer erreichbaren Stellen zu bringen. Er wird als fliegendes Patrouillenfahrzeug für die Polizei und als Luftkran in der Bauwirtschaft und bei Ölbohrungen dienen.

Die Ergebnisse einer kürzlich durchgeführten Marktanalyse deuten darauf, dass bis 1976 rund 11000 Hubschrauber für die allgemeine Luftfahrt und etwa 280 Passagier-Hubschrauber hergestellt werden. Falls sich diese Voraussage bewahrheitet, müsste die jährliche Produktion durchschnittlich auf 1000 Maschinen steigen (im Jahre 1967 waren es 485). Der