Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 79 (1987)
Heft: 1-2

Artikel: Das Prototyp-Gezeitenkraftwerk Annapolis Royal in Kanada
Autor: DeLory, R.P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940615

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: 10.07.2025

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

Das Prototyp-Gezeitenkraftwerk Annapolis Royal in Kanada

R.P. DeLory

Das Gezeitenkraftwerk Annapolis Royal (Kanada) wurde 1984 ans Netz geschaltet. Im ersten Jahr erreichte es eine Verfügbarkeit von 99%. Es ist das erste Gezeitenkraftwerk in Nordamerika und das erste der Welt, in dem eine Straflo-Turbine mit grossem Durchmesser arbeitet (Bild 1).

1980 wurde der Bau eines Gezeitenkraftwerks mit einer Straflo-Turbine im Annapolis-Becken in Nova Scotia in Auftrag gegeben. Das Annapolis-Becken ist ein Seitenarm der Bay of Fundy (Bild 2), die zwischen den kanadischen Provinzen Nova Scotia und New Brunswick liegt [1].

Die Bay of Fundy soll den grössten Gezeitenunterschied der Welt haben (bis zu 15,8 m); das Annapolis-Becken liegt jedoch weiter draussen in der Bucht, wo die Gezeitenunterschiede nur etwa halb so gross sind wie an den stromaufwärts gelegenen Stellen. Das Kraftwerk sollte dazu dienen, eine Straflo-Turbine mit grossem Durchmesser für den späteren Einsatz in Grossprojekten zu erproben.

Bevor dieses Kraftwerk zur Diskussion stand, lagen allen Studien für die Bay of Fundy Standard-Rohrturbinen mit 7,5 m Durchmesser zugrunde. Studien für andere grosse Gezeitenkraftwerke in der Welt gingen ebenfalls von 7,5-m-Einheiten oder von der Möglichkeit aus, zu 9-m-Rohrturbinen überzugehen, die noch nie gebaut worden sind.

Straflo-Turbine

Turbine und Generator bilden ein direkt gekoppeltes Aggregat ohne Antriebswelle. Der Generator liegt in der gleichen vertikalen Ebene und gleicher Achse um das Laufrad herum angeordnet, jedoch ausserhalb des durchströmten Rohrs. Diese Konzeption erlaubt eine kompakte Bauweise. Zwischen 1938 und 1950 wurden von Escher Wyss in Zürich über 70 axial durchströmte Straflo-Turbinen gebaut, die aber alle kleine Laufraddurchmesser (rund 2 m) hatten. Ende der siebziger und Anfang der achtziger Jahre wurden weitere zehn Maschinen mit Laufraddurchmessern bis zu 3,7 m in Auftrag gegeben.

Studien über die Bay of Fundy deuteten darauf hin, dass bei Verwendung von Straflo-Turbinen statt Rohrturbinen für ein Gezeitenkraftwerk beträchtliche Einsparungen erzielt werden können (vor allem bei den Baukosten). Da aber bisher noch keine grossen Straflo-Turbinen gebaut wurden, beschloss die Tidal Power Corporation in Nova Scotia eine solche Maschine zu erproben, bevor ein Entscheid für zukünftige Grossprojekte aktuell würde. So kam das Annapolis-Projekt zustande.

Der Laufraddurchmesser der Turbine wurde auf 7,6 m festgesetzt, eine mit den grössten Rohrturbinen und mit jenen Maschinen vergleichbare Grösse, welche die Tidal Power Review Board für ein grosses Bay of Fundy-Projekt vorgesehen hatte. Während der Inhalt des Staubeckens für den Betrieb von zwei Maschinen dieser Grösse ausreicht, war es

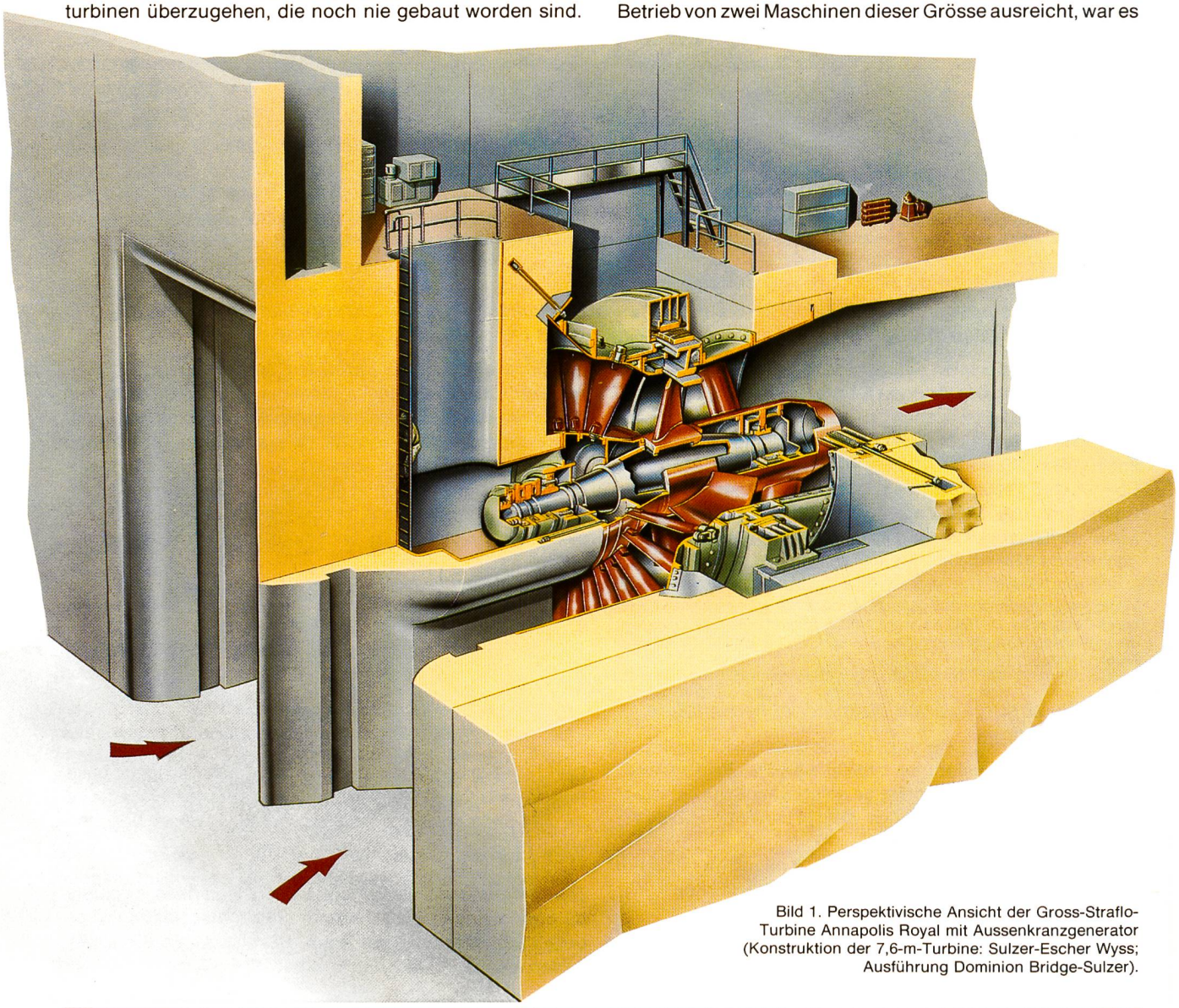


Bild 1. Perspektivische Ansicht der Gross-Straflo-Turbine Annapolis Royal mit Aussenkranzgenerator (Konstruktion der 7,6-m-Turbine: Sulzer-Escher Wyss; Ausführung Dominion Bridge-Sulzer).

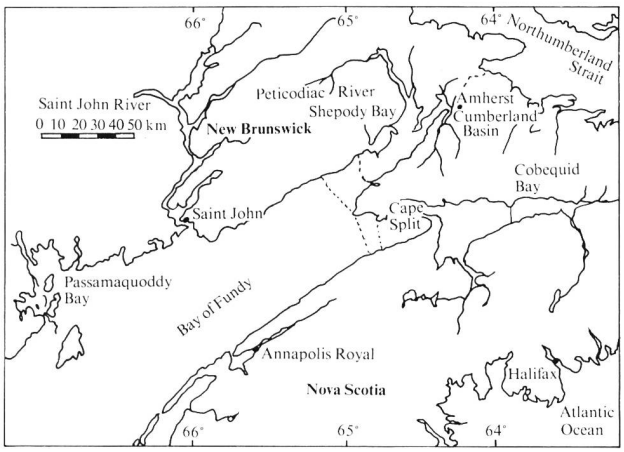


Bild 2. Lage des Kraftwerks Annapolis Royal und Gezeitenkraftwerk-Ausbaumöglichkeiten in der Bay of Fundy.

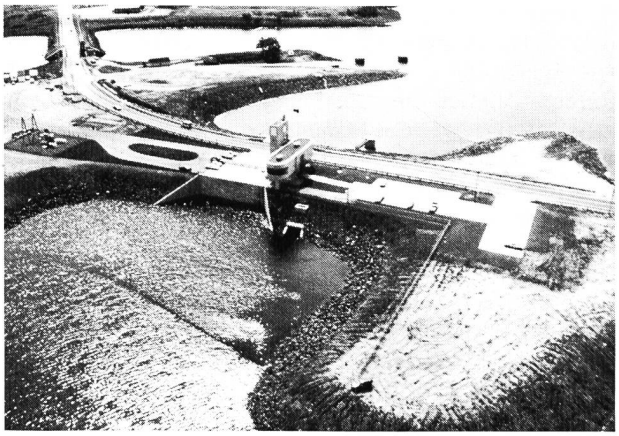


Bild 3. Kraftwerksgebäude in Annapolis Royal: kompakt und weitgehend unter Wasser.

wegen der Art des Projekts günstiger, eine Einzelmaschine zu wählen. Wegen des bescheidenen Gezeitenunterschieds (im Mittel rund 6,5 m) wären Investitionen in zusätzliche Stromerzeugungskapazität an dieser Stelle auch nicht attraktiv gewesen.

Die Hauptdaten der Maschine sind in Tabelle 1 angegeben. Turbine, Generator und Zubehör sind in einem eingetieften Kraftwerksgebäude (Bild 3) untergebracht. Bild 4 zeigt einen Längsschnitt durch dieses Gebäude.

Die Bauarbeiten umfassten die Verlegung einer bestehenden Strasse, den Aushub am Bauplatz, die Errichtung des Kraftwerksgebäudes im Trockenen, die Aufschüttung, die Rückverlegung der Strasse an ihren ursprünglichen Verlauf und schliesslich das Ausbaggern des Zulaufkanals und des Ablaufkanals.

Vorarbeiten

Die Turbinenachse liegt 8,39 m unter dem Meeresspiegel. Deshalb musste eine Baugrube mit 21 m Tiefe unter dem Meeresspiegel oder rund 30 m unter der Bodenoberfläche ausgehoben werden. Mit der Aushubtiefe zusammenhängende Platzbeschränkungen machten den Bau eines Kofferdamms stromaufwärts von der Baustelle notwendig. Der am Bauplatz vorkommende Glaziallehm (Tillit) bildete einen wasserundurchlässigen und sehr zufriedenstellenden Kofferdamm. Der Sickerverlust war unbedeutend, und die Baugrubenentwässerung beschränkte sich hauptsächlich auf das Auspumpen von Regenwasser. Die Absetzbecken, die zur Abscheidung von Sediment vor dem Ablassen von Drainagewasser angelegt wurden, waren nie stark belastet.

Ursprünglich war vorgesehen, die Bodenplatte des Kraftwerksgebäudes im darunterliegenden Sandstein zu verankern. Die Qualität des Materials war jedoch schlechter als erwartet, und so vergrösserte man die Bodenplatte, bis sie in die Aufschüttzone hineinreichte und damit dem Auftrieb einen ausreichenden Widerstand entgegensetzte.

Tabelle 1: Hauptparameter von Turbine und Generator in Annapolis

Laufraddurchmesser	7600 mm
Anzahl Laufschaufeln	4
Anzahl Leitschaufeln	18
Normaler Fallhöhen-Betriebsbereich	etwa 1,4 m bis 6,8 m
Maximale Fallhöhe	7,1 m
Nennfallhöhe in Betrieb	5,5 m
Turbinenleistung bei Nennfallhöhe	17,8 MW
Maximale Turbinenleistung	19,9 MW
Wasserstrom bei Nennfallhöhe	378 m^3/s
Turbinenwirkungsgrad bei Nennfallhöhe und Nennleistung	89,1%
Nenndrehzahl	50 U/min
Durchgangsdrehzahl	98 U/min
Generatorleistung bei 70° Wicklungserwärmung	19100 kVA
Generatorleistung bei 85° Wicklungserwärmung	21250 kVA
Generatorwirkungsgrad bei 100% Last	96,4%
Generatorwirkungsgrad bei 75% Last	96,5%
Generatorwirkungsgrad bei 50% Last	96,4%
Rotorschwungmoment	857000 kg/m^3

Das Kraftwerksgebäude ist 46,4 m lang und hat einen Einlauf, der zuerst 15,5 m im Quadrat misst und sich dann am Eintritt in den Leitapparat auf einen kreisförmigen Querschnitt verjüngt. Eine ähnliche Querschnittsveränderung erfährt das Saugrohr, das am Austritt 14,5×11,1 m misst.

Sowohl Einlauf wie Saugrohr sind durch Stützpfeiler geteilt, wodurch die Länge der Dammbalken halbiert wird. Ausserdem stützt der Pfeiler am Eintritt das oberwasserseitige Turbinenlager. Der Zugang sollte nach dem ursprünglichen Konzept durch ein Stahltorpedo erfolgen. Der statt dessen verwendete Pfeiler bringt Einsparungen bei den Materialkosten, eine grössere Steifheit und eine bessere hydraulische Form.

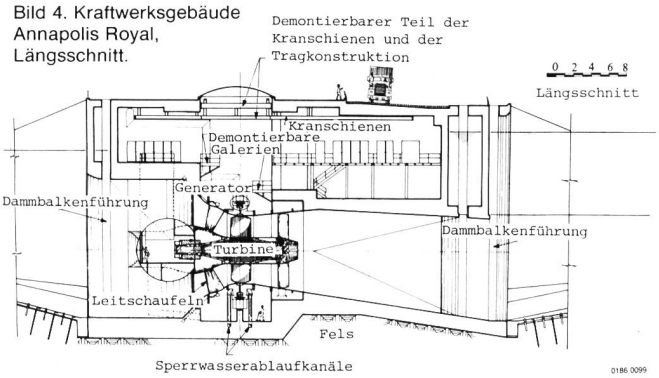
Eine wahrscheinlich zu erwartende Weiterentwicklung dieses Konzepts wird einen Wegfall des unterwasserseitigen Lagers und der Stützstreben mit sich bringen. Die Folge davon wären eine feststehende Welle und ein einziges, mit dem Rotor in einer Ebene liegendes Lager und damit eine weitere Vereinfachung und Kostensenkung.

Das unterwasserseitige Lager wird von einem Gehäuse aufgenommen, das von in der Saugrohrwand verankerten Stahlstreben gestützt wird. Es handelt sich dabei nur um ein Führungslager, so dass die auf die Streben wirkenden Kräfte klein sind.

Die Turbine und der Generator sind in der Mitte des Turbinenschachts untergebracht. Die Generator-Hauptstützen sind Platten an den Schachtwänden, die ein seitliches Herausziehen des Generators aus der Laufradebene für Montage- und Unterhaltsarbeiten gestatten.

Weder am Einlauf noch am Saugrohr sind Schützen vorgesehen. Bei Versagen des Leitrad-Notschlusses trotz

Bild 4. Kraftwerksgebäude Annapolis Royal, Längsschnitt.

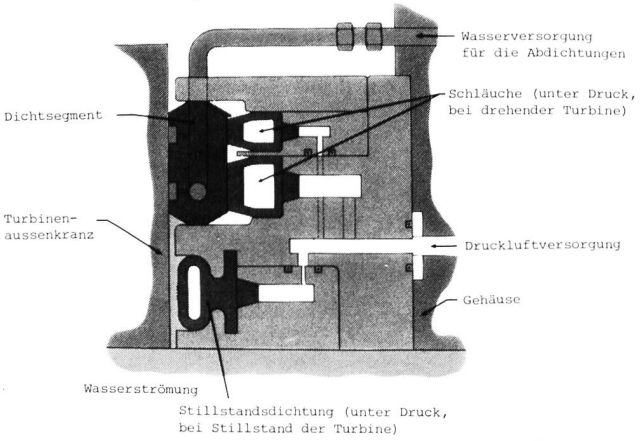


Schliessgewicht würde die Maschine so lange auf Durchgangsdrehzahl gehen, bis Tidenhub und damit der Durchfluss genügend klein wäre, dass die Dammbalken gesetzt werden könnten. Die dabei auftretende Durchgangsdrehzahl des Straflo-Propellerlaufrades liegt wesentlich unter der maximalen Durchgangsdrehzahl doppelt regulierter Rohrturbinen. Es sind Oberwasser- und Unterwasser-Dammbalken vorhanden, damit die Maschine für Unterhaltsarbeiten trockengelegt werden kann.
Der Leitapparat besteht aus einem Aussenring, 18 Leitschaufeln mit Antrieb und einem inneren Leitradkonus. Der Aussenring ist im Beton des Einlaufs und der Konus im Betonstützpfeiler verankert. Die Leitradschaufeln werden von Servomotoren über hydraulische Kolben, einen Regulierring und Verbindungshebel verstellt.
Die Laufradschaufeln sind mit einer Nabe und einem Aussenring verschweisst. Die oberwasserseitigen und die unterwasserseitigen Abschnitte der hochsteifen Hohlwelle mit grossem Durchmesser sind mit der Nabe verschraubt. Das oberwasserseitige Ende läuft in einem kombinierten Spur- und Führungslager, das unterwasserseitige nur in einem Führungslager. Beides sind hydrostatische Schalenlager. Zur Wasserpassage zwischen Laufrad und Saugrohr gehören schliesslich noch der Laufradmantel und das unterwasserseitige Turbinengehäuse.
Rostfreier Stahl wurde nur an kritischen Stellen verwendet: für die Beschaufelung, die Plattierung an benetzten Oberflächen von Nabe und Aussenkranz, die Berührungsflächen von Dichtungen und die Dichtkanten der Leitschaufeln. Alle anderen Bauteile bestehen aus Kohlenstoffstahl. Für den Korrosionsschutz verlässt man sich auf einen aktiven kathodischen Schutz.
Die Kranzdichtungen sind als hydrostatische Dichtungen ausgeführt. Vom zugeführten Sperrwasser fliesst ein Drittel durch die Dichtungen in das Saugrohr, und zwei Drittel werden im Sperrwassersystem umgewälzt. Dadurch entsteht eine Strömung aus dem Dichtungssystem nach aussen, die ein Eindringen abrasiver Substanzen verhindert. Eine zusätzliche Schlauchdichtung wird aufgeblasen, um das System während des Stillstands abzudichten. Bild 5 zeigt Details im Querschnitt.

Generator

Die Generatorkonstruktion wird zu einem grossen Teil von den Anforderungen an die Turbine bestimmt. Die 144 Generatorpole sind direkt auf den Aussenkranz des Rotors geschraubt. Ihre Zahl ergibt sich aus der Nenndrehzahl der Turbine. Die Pole werden statisch erregt, und die Stromzuführung erfolgt durch den oberwasserseitigen Wellenabschnitt und die Laufradschaufeln.

Bild 5. Kranzdichtungen Querschnitt.



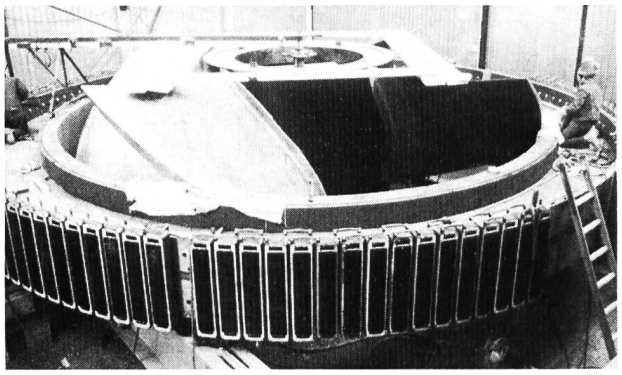


Bild 6. Rotor mit Generatorpolen.

Der Stator mit 13 m Gesamtdurchmesser wird von Flanschen abgestützt, die auf in der Wand des Kraftwerksgebäudes einbetonierten Stahlplatten liegen. Drehmomente und transiente Lasten werden ausserdem über je eine Verbindung oben und unten am Stator auf das Kraftwerksgebäude übertragen.
Eine der Konstruktionsanforderungen war das Einhalten eines gleichbleibenden Luftspalts über den gesamten Last- und Temperaturbereich. Dies wurde dadurch erreicht, dass man den Stator als Ganzes mit möglichst gleichbleibender Steifheit baute.
Die Isolierung erlaubt das Anfahren auch nach einer eventuellen Überflutung mit Meerwasser. Der Generator muss zuvor nur einmal mit Süsswasser gespült werden. Die Isolierung des Stators besteht aus glasfaserverstärktem Micamat-Band mit Epoxidharzklebung, ausgelegt für einen Betrieb bei 130°C. Die Polisolierungen sind ebenfalls mit Epoxidharz geklebt.
Der Generator ist luftgekühlt. Die Abwärme wird über Wärmeaustauscher ans Meer abgegeben. In einer Freiluftumspannstation wird die Spannung von 4160 kV für die Einspeisung ins Netz der Nova Scotia Power Corporation auf 69 kV transformiert.

Montage und Inbetriebsetzung

Die Montagearbeiten in Annapolis begannen mit der Positionierung der äusseren und inneren Fundamentringe. Nachdem diese ausgerichtet waren, wurden sie im Beton verankert. Die unterwasserseitige Lagerstütze wurde innerhalb der Grenzen ihrer mechanischen Einstellmöglichkeiten ausgerichtet. Darauf folgte der Reihe nach die Montage von oberwasserseitigem Wellenkonus, Leitapparat, unterwasserseitigem Wellenkonus, oberwasserseitigem Laufradmantel und Laufrad. Die Wellen wurden gegenüber ihrer endgültigen Lage vor- bzw. zurückversetzt, und der Stator wurde aus der Rotorebene geschoben, damit der Rotor (Bild 6) eingebaut werden konnte.
Der Stator und die schwereren Turbinenbauteile wurden im Oktober 1982 mit dem Schiff an die Baustelle transportiert (Bild 7). Für die Montage wurden die Bauteile auf Schienen zum Schacht gefahren, wo sie mit einem 270-t-Portalkran angehoben, in die gewünschte Position gedreht und in den Schacht abgesenkt wurden.
Die Anlage arbeitet als einfachwirkendes Gezeitenkraftwerk mit einem einzigen Becken. Das Staubecken wird bei Flut über die Schützenöffnungen und durch die Turbine gefüllt. Wenn die Ebbe so tief ist, dass sich eine optimale Startfallhöhe ergibt, läuft das Wasser durch die dann Strom erzeugende Turbine ins Meer zurück.
Somit kommt es bei jeder Flut zu einem Stromerzeugungszyklus von 6 bis 6,5 h Dauer. Die jährliche Leistung beträgt etwa 45 GWh und hängt vom maximalen Wasserstand im

Bild 7. Eintreffen des Turbinenstators auf der Baustelle.

Staubecken ab, den die Umweltschutzbehörde von Nova Scotia zulässt.

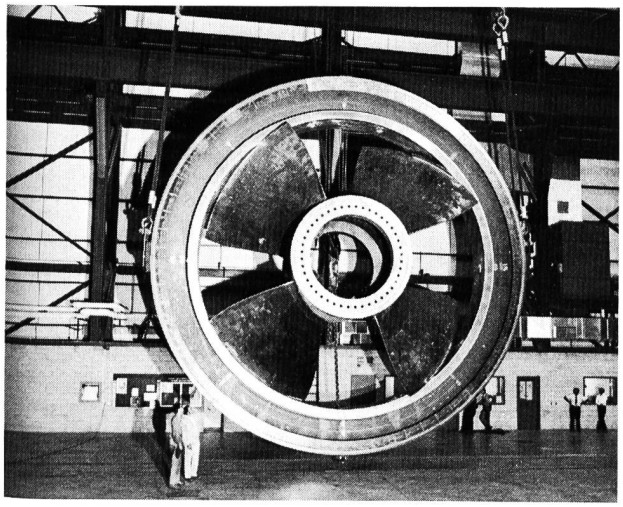
Die Inbetriebnahme der Anlage verlief einwandfrei, obwohl eine Reihe von Systemen von der Arbeitsniederlegung (über sechs Monate) während eines Streiks betroffen waren. Die am stärksten betroffenen Bereiche waren Lager, Ölversorgungssysteme, Dichtungen und Generatorisolierung.

Die Turbinenlager und die Lageröl-Versorgungssysteme für Schmieröl, Lageranhebeöl und Spurlagerdrucköl waren zu Beginn des Streiks fast schon montiert, konnten aber noch nicht mit Öl gefüllt werden. In diesem Zustand blieben sie während der ganzen Streikdauer in sehr feuchter Umgebungsluft. Die Lager mussten auseinandergenommen und gereinigt und die Ölleitungen in kleinere Kreisläufe aufgeteilt und mit warmem Öl aus einer Hochleistungspumpe gespült werden. Dann wurden Hochdruckölfilter eingebaut, damit festgestellt werden konnte, welchen Sauberkeitsgrad man erzielt hatte. Es brauchte sechs Wochen, bis der erforderliche Standard wieder erreicht war.

Die hydrostatischen Dichtungen werden mit 13,5 l/s Meerwasser geschmiert, das auf 40 μm gefiltert wird. Die Originalfilter arbeiteten während des ersten Winters zufriedenstellend. Bei den Wasserabflüssen im Frühling wurden sie aber durch feste Schwebstoffe und im Sommer durch Meeresplankton überlastet. Darauf wurden vier neue Filter mit hoher Rückspülleistung installiert.

Das Drittel des Sperrwassers, das radial nach aussen und damit in das Kraftwerksgebäude fliesst, wird in ein Kollektorsystem abgelenkt, von wo es über ein Messwehr in einen Sumpfschacht geleitet wird. Die ersten Ableitvorrichtungen verursachten einen Wassersprühnebel, der in die Generatorpole gelangte. Eine spätere Änderung behob diesen Mangel. Ausserdem trat Sperrwasser durch die Schraubenlöcher der Polbefestigungsschrauben am Kranz. Um das Wasser abzuhalten, baute man dort Dichtungen.

Bild 8. Rotor mit Generatorpolen nach Werkmontage.



Die ursprüngliche Konstruktion sah einen vollständig gekapselten Rotor vor. Während der Planungsphase änderte der Lieferant aber die Konstruktion, so dass die einzelnen Pollamellen nur auf drei Seiten isoliert waren und an der Aussenkante das Kupfer blank lag (Bild 8).

Wegen der Undichtigkeiten im Sperrwasser-Sammelsystem und der allgemein salzhaltigen Umgebungsluft bildeten sich auf den ungeschützten Poloberflächen Salzablagerungen. Dadurch kam es zu Kriechströmen von den Wicklungen zum Polkern, und einige Pole wurden beschädigt. Daraufhin wurden alle 144 Pole von der Maschine abmontiert und im Werk des Lieferanten mit zwei Schichten Kohlenteer-Epoxidharz versehen.

Betriebserfahrungen

Im ersten Betriebsjahr erreichte die Anlage eine Verfügbarkeit von 99%. Von 728 möglichen nutzbaren Fluten konnten nur acht nicht genutzt werden. Bei 75% aller Stromerzeugungszyklen lief die Anlage den ganzen Zyklus hindurch störungsfrei. Bei den restlichen 25% traten kurzzeitige Betriebsunterbrechungen wegen mechanischer Störungen in den Hilfssystemen auf.

Während der folgenden sechs Monate blieb die Verfügbarkeit weiterhin auf dem Wert von 99%, und von 353 nutzbaren Fluten konnten nur vier nicht genutzt werden. Die Anzahl der störungsfreien Stromerzeugungszyklen stieg aber von 75 auf 96%. Bis auf eine traten alle Störungen in den Hilfssystemen auf.

Im Juni 1985 wurden die Maschinen zum erstenmal einer grösseren Inspektion unterzogen. Alle hydrostatischen Dichtungen befanden sich in einwandfreiem Zustand, doch die oberwasserseitige Stillstandsdichtung war beschädigt. Es ist nicht genau bekannt, wie sie beschädigt wurde, man vermutet aber, dass es während der Inbetriebsetzung geschah. Es ist möglich, dass die Dichtung in der Zeit des Streiks am Kranz festklebte. Diese Vermutung wird auch durch die Tatsache erhärtet, dass bei der ersten Drehung der rotierenden Teile aussergewöhnlich grosse Kräfte erforderlich waren. Die Laufradschaufeln zeigten keine Anzeichen von Kavitation oder Korrosion, nur an der Laufradnabe waren schwache Spuren von Korrosionsangriff sichtbar. Alle übrigen Metallteile waren in ihrem ursprünglichen Zustand, was darauf hindeutet, dass der kathodische Schutz sehr wirksam war.

Wenn man berücksichtigt, dass es sich bei dieser Einheit um eine Pilotanlage handelt, die dazu dient, etwaige Probleme aufzuzeigen, die bei viel grösseren Anlagen besondere Aufmerksamkeit erfordern würden, ist ihr Betriebsverhalten für den Eigner wie für den Lieferanten sehr erfreulich. Es sollen nun weiterhin Daten hinsichtlich der Erfahrungen mit der Maschine in Annapolis gesammelt und allen interessierten Stellen zugänglich gemacht werden. Gegenstand der Untersuchungen werden auch Leistung, Stromerzeugungsverhalten, Verfügbarkeits- und Unterhaltserfahrungen, Kavitation, Rotordurchbiegung, Dichtungsverschleiss und Korrosionsverhalten sein.

[1] *Douma, A., Steward, G.D., Meier, W.:* Straflo-Turbine Annapolis Royal, Erstes Gezeitenkraftwerk in der Bay of Fundy. «Escher-Wyss-Mitteilungen» Bd. 84 (1981), H. 1.

Adresse des Verfassers: *R.P. DeLory,* Nova Scotia Power Corporation, Halifax, Kanada.

Überarbeitete Fassung aus «Modern Power Systems», Juli 1986, S. 31–33.