

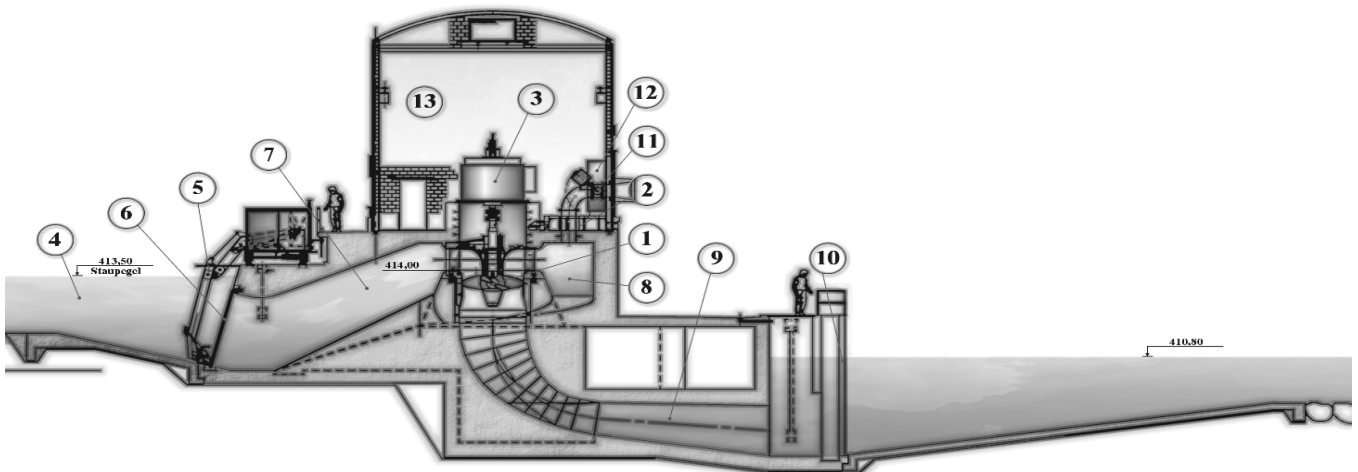
Schlussbericht Februar 2001

Demonstrationsprojekt Saugheber - Turbinen Wasserturbinenanlage Papierfabrik Perlen (WTA-PF)

Erneuerung und Reaktivierung Ultraniederdruck-Kraftwerk
Wirtschaftlich-technologische Innovation

ausgearbeitet durch

 **ITECO**
Ingenieurunternehmens AG
Alte Obfelderstrasse 68
8910 Affoltern a/A



INHALT

1 Zusammenfassung	3
2 Das Prinzip der Saugheber-Turbine	4
3 Handlungsbedarf und Potential	7
4 Aufgabenstellung im Falle der WTA-PF	8
5 Suche nach der optimalen Lösung	9
6 Die Saugheberlösung	10
7 Weitere Bausteine zu einem effizienten Gesamtkonzept	12
8 Spielverderbende Asymmetrien verhindern	13
9 Konzept für einen kostengünstigen Betrieb	14
10 Minimale Umweltauswirkungen	17
11 Resultate und Fazit	17

ANNEX / ANNEXE:

- **Hydraulische Eigen-Stromerzeugung**
- **Résumé en français**
- **Text and executive summary in English**



INNOVATIVE HYDRAULISCHE UND ELEKTRISCHE KONZEPTE:

Die Betonringe verraten die erhöhte Einbaukote der Saugheberturbinen. Darin befinden sich Welle, Turbinenlager und Stillstandsbremse sowie unmittelbar darunter die Turbine. Das Bild zeigt die qualitativ hochstehende Ausführung und die grosszügige Gestaltung des Maschinenhauses. Die grossen, langsamlaufenden und direkt an die Turbinen gekoppelten Generatoren prägen das Erscheinungsbild der Anlage.

Résumé en français: annexe
English: see annex

1 Zusammenfassung

In der Schweiz liegt ein beachtliches Energiepotential in stillgelegten und überalterten kleinen und kleinsten Niederdruck-Wasserkraftwerken brach. Je kleiner das Nutzgefälle und die Leistung, um so höher fallen die Energiegestehungskosten aus. Für eine Erneuerungen dieser Anlagen besteht deshalb ein grosser Innovationsbedarf für kostengünstige Lösungen.

Die beiden Wasserkraftwerke der Papierfabrik Perlen entsprechen diesem Typus. In Serie am gleichen Ausleitkanal gebaut, turbinieren sie mit je 2.7 Metern Nettogefälle einen über fast das ganze Jahr gleichbleibenden Wasserstrom von 45 m³/s. Die obliegende Anlage "Wasserturbinenanlage Holzfabrik" wurde bereits 1981 komplett erneuert. Bei der "Wasserturbinenanlage Papierfabrik" stand der Entscheid zwischen Stilllegung oder Erhalt in der Mitte der Neunziger Jahre an, als die letzte der alten Turbinen ausfiel und eine Reparatur nicht mehr wirtschaftlich war.

Der Erneuerungsentscheid war an die Vorgabe gekoppelt, mit dem Konkurrenzpreis des von der Papierfabrik auf Mittelspannungsebene beschafften Stromes mithalten zu können (als Grosskonsument erhält die Fabrik kostengünstigen Strom!) Dieser Herausforderung wurde einerseits mit der innovativen und kostensparenden Technik der Saugheber-Anordnung der Turbinen begegnet und andererseits mit einer sehr konsequenten Planung, Auftragsvergabepolitik und straffen Bauleitung.

Erstmals kommen in der Schweiz "vollgeheberte" Turbinen in konsequenter Einfachtechnologie zum Einsatz, d.h. das Wasser kann ohne eine Hebung durch ein Vakuum nicht in die Turbinen einfliessen. Für das Maschinenhaus und die Turbinen kann deshalb fast vollständig auf Abschlussorgane verzichtet werden.

Es werden drei einfachregulierte vertikale Achsialturbinen mit der Maximalleistung von je 342 Kilowatt elektrischer Leistung eingesetzt. Mit dieser Gesamtleistung von 1'026 Kilowatt wird eine mittlere Jahresproduktion von rund 8 Millionen Kilowattstunden erzeugt.

Die innovative Technik der Saughebung brachte eine Einsparung von rund 20 % bei den Erstellungskosten und geringere Betriebskosten.

Bei der Energieproduktion wurden keine Kompromisse infolge schlechterer Wirkungsgrade, Verfügbarkeit usw. eingegangen. Im Gegenteil: Mit strengen Garantien wurde der Einsatz der hydraulisch besten Modelle mit Wirkungsgraden erreicht, welche Hochleistungs-Grossturbinen entsprechen, und eine hochentwickelte Leittechnik optimiert den Turbineneinsatz.

Mit einer Verbesserung des Kanaleinlaufs konnte die Jahreswassermenge erhöht werden. Bei den extrem kleinen Nutzgefällen der Anlage ist eine ungestörte An- und Abströmung der Turbinen ausschlaggebend. Es wurde deshalb auf die Symmetrie und Geradlinigkeit der Ein- und Ausläufe geachtet.

Das Weglassen von Abschlussorganen und Getrieben - die Generatoren sind langsamläufig und direkt gekoppelt - spart Unterhalts- und Baukosten ein. Die hohe Qualität der Ausrüstung erlaubt zudem eine sehr lange Lebensdauer und rundet das wirtschaftliche Konzept ab. Das Gesamtkonzept bringt niedrige Betriebskosten und überzeugt auch ästhetisch. Schwachstellen haben sich keine gezeigt.

Im ersten Betriebsjahr hat sich die Saughebung bewährt. Lediglich das Anfahren der Turbinen ist wegen der gegensynchron zu betätigenden Bypassklappen und der sehr knappen Freiborde heikel. Die erwartete Energieproduktion wurde übertroffen, was zum Teil jedoch auch auf das niederschlagsreiche Jahr zurückzuführen ist.

Das Projekt zeigt auf, dass heute eine Erneuerung der industriellen Selbstversorgung wirtschaftlich sein kann. Die Technik der Saughebung kann bisher knapp unwirtschaftliche Potentiale zur Wirtschaftlichkeit bringen. Das Konzept wird nun in Planungskreisen öfters aufgegriffen und der Lieferant vermeldet bereits Erfolge in der energetischen Nebennutzung von Bewässerungsanlagen.

Die Strommarktöffnung wird schärfere Konkurrenzverhältnisse bei der Energiebeschaffung bringen. Das anlässlich der parlamentarischen Beratung des im Dezember 2000 verabschiedeten Elektrizitätsmarktgesetz vom Bundesrat bekräftigte "Nettoprinzip" sieht bei Eigenproduktion von der Verrechnung von (fiktiven) Durchleitkosten ab - ein ausschlaggebender Kostenvorteil gegenüber zugekaufter Energie. Dank dem "Nettoprinzip" werden beide Wasserturbinenanlagen Perlen wirtschaftlich bleiben.

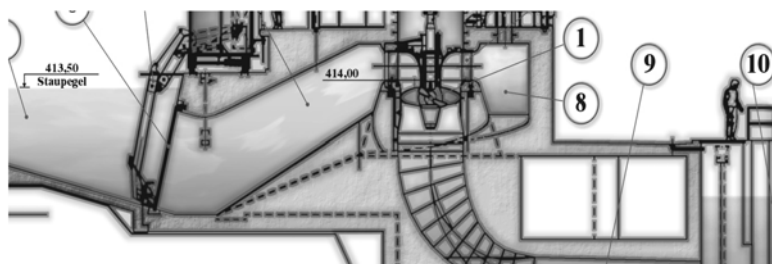
2 Das Prinzip der Saugheber-Turbine

Bei einer vollen Saugheber-Anordnung wird die Turbine derart platziert, dass der tiefste Punkt des Einlaufquerschnittes immer über dem Oberwasserspiegel liegt. Im **Ruhezustand** kann kein Wasser in das Laufradgehäuse einlaufen.

Turbinen-Abschlussorgane für Abstellvorgänge, Notabschaltungen und für Revisionen können deshalb bei diesen auch "Siphonturbinen" genannten Maschinen eingespart werden. Wenn sich die Triebwasserführung wenig verändert, kann die im Niederdruckbereich üblicherweise verwendete Kaplan- oder Rohrturbine (Achsialturbine) mit einer Einfachregulierung ausgeführt werden. Bei dieser konstruktiven Vereinfachung werden entweder die Leit- oder die Laufschaufeln oder im Extremfalle beide nur einstellbar oder sogar definitiv fixiert ausgeführt.

Das Laufrad von Achsialturbinen kann grössenbedingt bei vergleichbarem Aufwand für schnellere Verstellgeschwindigkeiten ausgerüstet werden als der Leitapparat. Im weiteren büsst eine Turbine durch den Verzicht auf die Leitschaufelregulierung weniger Wasserstromflexibilität ein als beim Verzicht auf die Laufradregulierung (wobei die andere Beschaufelung jeweils regulierbar bleibt). Die Laufschaufelverstellmechanik ist jedoch viel anspruchsvoller als diejenige der Leitschaufel. Die Wahl ist deshalb von Fall zu Fall verschieden.

Im Falle der Wasserturbinenanlage Papierfabrik Perlen (WTA-PF) wird auf die Leitapparatregelung verzichtet und das Laufrad reguliert. Diese Kombination bringt ein besonders wirtschaftliches Auslegungskonzept (s. Kap. 6).



Legende siehe Kapitel 6

Unter Beachtung der Kavitationsgrenzen¹ kann hydraulisch betrachtet eine Turbine in nahezu jeder Lage eingebaut werden. Es kann deshalb grundsätzlich jede Reaktionsturbine in einer Saugheber-Anordnung eingebaut werden: Francis, Diagonal, Kaplan, umgekehrte Pumpen usw. Wenig Sinn macht die Betrachtung bei den ohnehin über dem Wasserspiegel angeordneten Aktionsturbinen wie Pelton- und Durchströmturbine.

Die Turbinenhydraulik wird von der Saugheber-Anordnung nicht beeinflusst. Dies bedeutet, dass die Turbinenwahl, Einbauart, Hydraulik und Konstruktion ohne Einschränkungen optimiert werden kann.

Die Einlaufkontur kann eine Spirale, ein Schacht oder eine Rohrleitung sein. Hauptsache, alle Elemente sind luftdicht miteinander verbunden und eine Tauchnase sichert den Einlauf gegen das Eindringen von Luft. Wegen des grösseren Unterdrucks beim Laufrad muss auch dafür gesorgt werden, dass kein Schmiermittel in das Triebwasser gesaugt wird. Die Turbinen der WTA-PF sind deshalb mit wassergeschmierten Lagern ausgerüstet.

Bei bestimmten baulichen Vorgaben findet übrigens auch eine Teilhebung sinnvolle

¹ Kavitation: Sinkt der Druck in einer Strömung unter den Dampfdruck, so entstehen Dampfblasen. Da bei Wiederanstieg des Druckes im Strömungsweg die Dampfblasen unter hohen Druckspitzen implodieren und Lochfrass erzeugen, wird das Phänomen in der Hydraulik "Kavitation" genannt. Die Turbinenlieferanten legen aufgrund von Laborversuchen fallweise fest, welche maximale Aufstellungshöhe der Turbine in Bezug auf den Unterwasserspiegel zulässig ist.

Anwendungen. Dabei wird jedoch auf alle mit dem wasserfreien Ruhezustand verbundenen Vorteile verzichtet.

Zum Beaufschlagen der Turbine wird der Wasserspiegel in der Einlaufspirale mit einem **Vakuum** von einigen Dezimetern Wassersäule angehoben, bis genügend Wasser zum Anlaufen über die Unterkante des Leitapparatrings fließt. Dies kann mit einer Vakuumpumpe geschehen, mit den Vorteilen der Schnelligkeit sowie der programmierbaren Regelung und Überwachung des Vorganges.

Insbesondere bei kleineren Turbinen eignen sich auch hydraulische Ejektoren nach dem Prinzip der Staustrahlpumpen - mit den Vorteilen, dass sie keine rotierende Teile enthalten und für einen Schwarzstart keine Fremdenergie benötigen. Bei besonders günstigen Oberwasserverhältnissen kann zum Starten auch einfach der Oberwasserspiegel künstlich angehoben werden, bis das Wasser in die Turbinen läuft.

Eine Überfallhöhe von wenigen Prozenten des Laufraddurchmessers über dem unteren Stützschaufelring genügt bei vertikalachsigen Gruppen zum **Anlaufen**. Bei den Rohrturbinen mit vertikalen oder schrägen Querschnitten über dem Scheitelpunkt ist die notwendige Überfallhöhe über dem untersten Punkt entsprechend grösser.

Das auf das Laufrad fallende Wasser reisst verwirbelte Luft durch das Saugrohr mit und beschleunigt den Evakuierungsvorgang, so dass die Turbinen in wenigen Sekunden regelrecht anspringen.

Der weitere Anlaufvorgang unterscheidet sich nicht von konventionell eingebauten Maschinen: synchronisieren, ans Netz schalten, belasten und der Regelung des Kraftwerks unterstellen. Ist die Einlaufstruktur geeignet geformt, wird die restliche Luft im Normalbetrieb restlos ausgespült. Allfällige Restluft bei extremem Teillastbetrieb oder wegen zu hoch gebautem Querschnitt kann falls notwendig auch automatisch mit einer Pumpe oder einer Saugleitung abführt werden.

Zum **Abstellen** kann die Turbine wie bei konventionellen Maschinensätzen mit dem Laufrad in den Leerlauf gefahren und vom Netz getrennt werden. Da die meisten Laufräder den Fliessquerschnitt nicht vollständig versperren und die Schaufeln nicht durchschwenken können, verbleibt in vielen Fällen ein **Restdrehmoment und eine Restdrehzahl**, so dass sich eine Stillstandsbremse aufdrängt. In der Regel verbleibt auch nach Abbremsen ein **Stillstandswasserstrom**.

Bei luftdichten Strukturen bleibt das Vakuum in der Einlaufspirale tagelang erhalten, so dass die Maschinen jederzeit schnell wieder anlaufen können.

Schlägt der Wasserverbrauch wegen des Stillstandswasserstromes zu Buche (z.B. wenn der Oberwasserspiegel deshalb nicht auf dem Sollstand gehalten werden kann) oder sind Kavitationsschäden und Sanderosion nicht ausgeschlossen, so kann die Turbine mit Belüften des Gehäuses entwässert werden. Dies ist zulässig, wenn Lastabwürfe selten sind und kein Inselbetrieb mit kurzen Anlaufzeiten gefordert ist.

Ein Wiederanlaufen benötigt wiederum die **Evakuierungszeit**. An Orten mit häufigen Lastabwürfen müsste deshalb ein Notabschaltkonzept ohne sofortiges Belüften vorgesehen werden.

Für die **Schnellabschaltung** und bei Lastabwurf bietet sich an, zwecks Begrenzung von Überdrehzahl und Durchgangswasserstrom, sofort die Belüftung einzuleiten. Die Belüftungsarmaturen - in der Regel ein Rohr mit einer Drosselklappe - müssen jedoch grosszügig dimensioniert sein: Die Belüftungskapazität muss bei allen möglichen Betriebszuständen weit über dem Volumenstrom der vom Turbinenwasser mitgerissenen Luft liegen - ansonsten wird der Abstellvorgang verunmöglicht. Das Antriebsmoment fällt in wenigen Sekunden auf Null - schneller als bei konventioneller Regelung mit Schliessen von Schaufeln. Das Auslaufen der Turbinen in Luft dauert lange - ein Grund mehr für den Einbau einer Stillstandsbremse.

Stolpersteine in diesem Konzept sind bei unvorhergesehen Wasserständen im Oberwasser durchaus möglich: Die Turbine kann wegen zu hohem Wasserstand beaufschlagt werden und ungewollt anlaufen oder sie kann wegen zu niedrigem Wasserstand durch den Einlauf belüftet werden und ungewollt abstellen. Diese Vorgänge können zu einem periodischen Anlaufen - Abstellen und damit zu Ondulationen und Wellen im Triebwasserkanal führen. Die Maschinengruppe würde vorzeitig verschleisst.

Weitere Fallstricke können Undichtheiten in den Unterdruckbereichen (z.B. der Wellendichtung) bilden. Ein bei den ersten Anlagen in den neunziger Jahren erkannter Fehler war eine zu klein dimensionierte Belüftung, die das Abstellen verunmöglichte. Selbstverständlich muss wegen der hohen Einbauhöhe ein schärferer Blick auf die Kavitationssicherheit geworfen werden.

Für Pico-Turbinen birgt die Saugheber-Anordnung ein zusätzliches **Innovationspotential**. Es ist eine einfach zu wartende Grobregelung denkbar: eine mechanische oder elektromechanische **Regelung des Belüftungsluftstromes** anstatt der regulierbaren Turbinenschaufeln (Leit- und Laufschaufeln). Die Wirkungsgrade würden allerdings darunter leiden. Anstelle der Turbinen können im Gegenzug unregulierbare kostengünstige Standardpumpen eingesetzt werden. Bei Parallelbetrieb ist eine automatische Wasserstandsregelung und bei Inselbetrieb ist mit der notwendigen Schwungmasse eine Drehzahlregelung denkbar (die Veränderung des Belüftungsluftstromes würde den Wasserstrom und den Wirkungsgrad verändern und damit auch die Leistung regeln).

Die Vorteile gegenüber den elektronischen Lastreglern für Inselbetrieb, welche dauernd eine elektrische Reserveleistung als Ballast "verheizen", liegen im geringeren Triebwasserverbrauch. Erschwernisse sind dabei Stabilitätsprobleme, geringere Regelgeschwindigkeit und mechanische Belastungen infolge der Turbulenzen. Die Feinausregelung der Drehzahl resp. der Frequenz im Inselbetrieb könnte bei Be-

darf ein kleiner Lastregler übernehmen. Auch Kavitationsrisiken müssten untersucht werden. Hier tut sich ein Feld für innovative Unternehmer auf.

Die Heberbauweise findet deshalb ihre Anwendung im Niederdruckbereich vor allem für Achsialturbinen. Es handelt sich in den meisten Fällen um grössere vertikalachsige Kaplanturbinen und um mittlere bis kleine Rohrturbinen für Spezialanwendungen, z.B. bei einem Einbau über unverändert belassene Bauwerke hinweg.

Das Konzept ist um so wirtschaftlicher, je grösser die Wassermenge im Verhältnis zur Leistung oder Fallhöhe ist, weil in diesem Bereich die Einsparung der Abschlussorgane mehr ins Gewicht fällt.

Das **Saugheberprinzip** wurde schon vor der Jahrhundertmitte angewendet und ging anschliessend wie vieles im Turbinenbau wieder vergessen. In der Mitte der neunziger Jahre hat es sich erneut in Frankreich durchgesetzt, vor allem für Niederdruck-Kleinstkraftwerke im Privatbesitz. Promotor ist eine französische Kleinfirma. Auch Kleinturbinenlieferanten im deutschsprachigen Raum Europas haben die Lösung bereits aufgegriffen - hier auch für Rohrturbinen. Qualitative oder betriebliche Schwierigkeiten gab es kaum. Viele der Realisierungen fussen jedoch mehr auf baulichen oder wasserbaulichen Gegebenheiten - weniger als selbständiges, ökonomisch-technisch optimales Konzept. In der Schweiz steht seit längerem in Luterbach im Kanton Solothurn eine vollgeheberte Kaplanturbine in Betrieb, die jedoch doppeltreguliert ist.

Die öffentlichen Energieversorger (meistens Betreiber mit etwas grösseren Anlagen) sind bisher dem Konzept und den Kleinfirmen skeptisch gegenübergestanden und die internationalen Grossfirmen haben die Lösung nur sehr zögerlich aufgenommen - es gab keinen zwingenden Grund, von den komfortablen klassischen Konzepten im Bereich der Rohr- und Kaplanturbinen abzuweichen. Heute ändert sich die Situation markant: die Marköffnung setzt alle Betreiber unter Kostendruck.

3 Handlungsbedarf und Potential

In der Schweiz sind viele Niederdruck-Kleinwasserkraftwerke stillgelegt oder werden mit einer "Ausfahrstrategie" minimaler Unterhaltsaufwendungen vernachlässigt betrieben, weil der **Ertrag** resp. die **Konkurrenzkosten** keine Sanierung erlauben. Diese sind je nach Betriebsfall, Anlagengrösse und Energieverwendung **sehr verschieden**.

KOMPLEXE ERTRAGSITUATION

A) BEZUGSKOSTEN MASSGEBEND:

Eigenproduktion von Grossbezügern:

- Ersatz von Energiebezug: Bezugskosten zu ca. **8 bis 12 Rp./kWh**
Tendenz mit der Markttöffnung: bereits stark fallend.

Eigenproduktion von Kleinbezügern:

- Ersatz von Energiebezug: Strombezug zu ca. **12 bis 18 Rp./kWh**
Tendenz mit der Markttöffnung: mittelfristig leicht fallend. (Haushalte: weniger fallend)

B) EINSPEISETARIFE MASSGEBEND:

Unabhängige private Produktion von Wasserkraftwerken bis 1 MW:

- Vergütung nach Energiegesetz und nach Empfehlungen des Bundesamtes für Energie (BFE) **12 bis 15 Rp./kWh**
(abhängig von den Produktionsanteilen Sommer und Winter)
Mit der Markttöffnung unverändert.

Unabhängige private Produktion von Kraftwerken über 1 MW:

- Vergütung nach Energiegesetz und Empfehlungen des BFE **7 bis 11 Rp./kWh**
(abhängig von den Produktionsanteilen Sommer und Winter und vom Verteilgebiet)
Mit der Markttöffnung voraussichtlich Anpassung der Empfehlung, Preise eher leicht fallend.

C) GROSSHANDELSPREISE MASSGEBEND:

Kleinwasserkraftwerke im Besitz der öffentlichen Energieversorger:

- Ersatz von Energiebezug: Strombeschaffung zu ca. 4 bis 11 Rp./kWh
Mit der Markttöffnung leicht fallend.

D) ÖKOSTROMMARKT MASSGEBEND:

Erneuerbare Energien werden den sofortigen Marktzugang erhalten und Kleinwasserkraftwerke bis 500 kW werden die Energie kostenlos durchleiten können:

- Grosser Kostenvorteil gegenüber Grosshandelspreisen abhängig von der Spannungsebene des Bezuges des Kunden. Details werden erst gegen Ende 2001 absehbar sein (Vernehmlassung der Verordnung zum Elektrizitätsmarktgesetz).
- Freiwilliger Aufpreis des Ökostromkunden angesichts des noch unerschlossenen Marktes nicht vorauszusagen: von weniger als einem Rappen bis zu 5 Rappen zu erwarten.

HOHE ENERGIEGESTEHUNGSKOSTEN:

Je kleiner die Leistung und je kleiner das Gefälle, umso höher sind die Energiegestehungskosten. Vielerorts wirken auch die örtlichen Verhältnisse verteuern.

Dem genannten Ertrag stehen deshalb im Ultra-Niederdruckbereich oft höhere Kosten gegenüber:

Produktionskosten von neuen und gesamterneuten Ultra-Niederdruck-Kraftwerken, über eine Investitionsperiode von 50 Jahren gemittelt: **8 bis 25 Rp./kWh**
(Kraftwerke unter 20 kW z. T. wesentlich höher)

Der Handlungsbedarf ist demnach für sehr kleine Niederdruck-Kraftwerke am grössten.

Kostensparende Konzepte sind energiepolitisch höchst willkommen, wenn sie keine Produktionseinbussen mit sich bringen und ein Segment von Projekten über die Schwelle der Rentabilität bringen und ein beachtliches Potential erschliessen helfen.

Das Saugheberprinzip ist vielversprechend, da es nicht auf vereinfachten hydraulischen Konturen oder elektrisch-mechanischen Kompromissen beruht, sondern eine **reine wasserbauliche Anordnung** beinhaltet, mit welcher nahezu die volle Freiheit zur Optimierung der Wirkungsgrade verbleibt.

4 Aufgabenstellung im Falle der WTA-PF

Früher eine Quelle lokalen Reichtums:

Mit hunderten von Kleinwasserkraftwerken legten innovative Unternehmer einst den Grundstein für das industrielle Zeitalter in der Schweiz. Die meisten nutzten nur geringe Flussgefälle und oft nur den dauernd vorhandenen Teil des Wasserdargebotes. Die hydraulischen Potentiale bestimmten den Standort der Industrien, wo heute vielerorts nur noch ein Strassenname an das Kraftwerk erinnert.

Die beiden Kraftwerke der Papierfabrik Perlen an der Reuss im Kanton Luzern entsprechen diesem Typ. Sie liegen an einem 3.2 Kilometer langen fabrikeigenen Ausleitungskanal. Die beiden in Serie als Durchlaufanlagen angeordneten Zentralen nutzen je 2.7 m Gefälle und leisten je rund ein Megawatt. Die Wasserturbinenanlage Perlen stand am Anfang der Fabrikation von Turbinen und Papiermaschinen in der Innerschweiz sowie der Papierfabrikation in Perlen. Die Anlage wurde ab 1869 von Theodor Bell erbaut und galt als eine Pionierleistung. Die weitsichtigen Erbauer der Erstanlage sahen Ausbauten in Etappen vor, welche bald darauf folgten.

Die Elektrifizierung der hier beschriebenen "Wasserturbinenanlage Papierfabrik" (WTA-PF) erfolgte zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts mit vier neuen "Generatorturbinen" der Firma Voith. Drei neue Turbinen trieben parallel dazu weiterhin mit rein mechanischer Kraftübertragung eine gemeinsame Königswelle an. Diese Welle trieb über Riementriebe Mahlmaschinen zur Stoffaufbereitung an, sogenannte Holländer - eine wirkungsgradoptimale Lösung. In den vierziger Jahren wurde die Holländerturbinenwelle an einen Generator gekoppelt und seither hat die WTA-PF mit ihren sieben Turbinen ohne nennenswerte Investitionen ihren Dienst getan.

Rückbauen oder nach Dienst über Generationen erneuern / reaktivieren?

Die oberliegende "Wasserturbinenanlage Holzfabrik" wurde bereits 1981 komplett neu erstellt und mit einer einzigen S-Rohrturbine ausgerüstet. Das doppeltregulierte, dreiflügelige Kaplanlaufrad mit 3.2 Meter Durchmesser dreht lediglich mit 103 Umdrehungen pro Minute und treibt über ein zweistufiges Stirnradgetriebe einen Synchrongenerator der Drehzahl 1000 min^{-1} an. Der moderne Kompaktbau weist keinen Hallenkran auf - die Maschinen müssen im Unterhaltsfall über Dachluken ausgehoben werden.

Im Laufe der achtziger Jahre gab in der WTA-PF eine Turbine nach der andern "den Geist auf". Zu schaffen machten vor allem die aufwendig zu reparierenden Holzverzahnungen mit Kammrädern und andere mechanische Schäden.



Ein Menschenalter lang hatten die extrem schweren und langsamläufigen Schaufeln, Zahnräder, Wellen und Generatorwicklungen zuverlässig Energie umgewandelt und übertragen. Anfangs der neunziger Jahre wurde der Betrieb der Zentrale schliesslich aufgegeben. Eine Reparatur kam wegen den schlechten Wirkungsgraden und dem für heutige Verhältnisse zu personalintensiven Betrieb nicht in Frage.

5 Suche nach der optimalen Lösung

Variantenstudie mit Vorgaben:

Eine Variantenstudie zeigte die Handlungsspielräume auf und kreiste optimale Lösungen ein. Alle Möglichkeiten von Abbruch, Gefällserhöhung der Oberliegeranlage, Maschinenersatz und Neubau wurden untersucht.

Entscheidend waren vorerst zwei Rahmenbedingungen:

- Erstens musste der Ausleitkanal als Vorfluter und wegen den bereits erbrachten Investitionen in die oberliegende Anlage mit voller Wasserführung erhalten bleiben.
- Zweitens wäre es für das Wasserkraftprojekt unökonomisch gewesen, irgendwelche Nutzungsveränderungen vorzunehmen, weil dies zu einer Neukonzessionierung mit zusätzlichen Auflagen und Triebwassereinbussen geführt hätte.

Es zeigte sich rasch, dass eine Zusammenlegung der Staustufen oder Nutzungserweiterungen keine Chancen hatten und nur eine Teil- oder Gesamterneuerung mit gleichem Bruttogefälle und Wasserstrom in Frage kam - oder eine Stilllegung mit Rückbaukosten.

Überraschendes Optimum:

Mit einer sorgfältigen Turbinenausschreibung wurde nach der optimalen Maschinenlösung gesucht. Die Resultate waren erstaunlich.

Ein Einmaschinenkonzept, wie es aufgrund der Gesetze der Economy of Scale zu erwarten wäre, erwies sich als nicht wirtschaftlich: Die Maschinenkosten resultierten höher, weil grössenbedingt der Turbinentyp wechselte und die Baumeisterarbeiten wegen der Tiefe und Länge des Baus teurer wurden. Seit der Erneuerung der oberliegenden WTA-HF hatte sich folglich auf dem Kleinturbinenmarkt etliches getan.

Auch eine Zweimaschinenlösung war wider Erwarten der Dreimaschinenlösung wirtschaftlich unterlegen, da mit drei Maschinen einfachere Bauarten und ein breiterer Anbietermarkt in Frage kamen.

"Exotische" Lösungen, wie z.B. drehzahlvariable kompakte Tauchturbinen ohne mechanische Regulierung in die sieben bestehenden Turbinenaussparungen und Saugrohre einzusetzen - nur scheinbar der baulich einfachste Ansatz -, ergaben höhere Kosten als "klassische" Lösungen, und darüber hinausgehend markante Produktionseinbussen.

Die Papierfabrik entschied sich in der Folge für die Gesamterneuerung der Anlage mit drei vertikalen Kaplanturbinen in einem grosszügigen Raumkonzept mit Hallenkran.

Innovationen aus dem Markt:

Die Turbinenausschreibung zeigte eindeutig in die Richtung einfachregulierter Kaplanturbinen. Angesichts der Konstanz der Wasserentnahme und der Aufteilung auf drei Turbinen war es faktisch ohne Produktionseinbusse gegenüber doppeltregulierten Maschinen möglich, auf die Verstellung der Leitschaufeln zu verzichten.²

Da gleichzeitig das Bauprojekt und noch deutlicher die Ausschreibung der Bauarbeiten zutage brachten, dass ein Erhalt des alten Backsteingebäudes wegen den Baurisiken gegenüber der Variante mit einem neuen Maschinenhaus schlechter abschnitt, drängte sich eine Lösung mit einer Saugheber-Anlage und einem angehobenen Maschinenhaus auf.

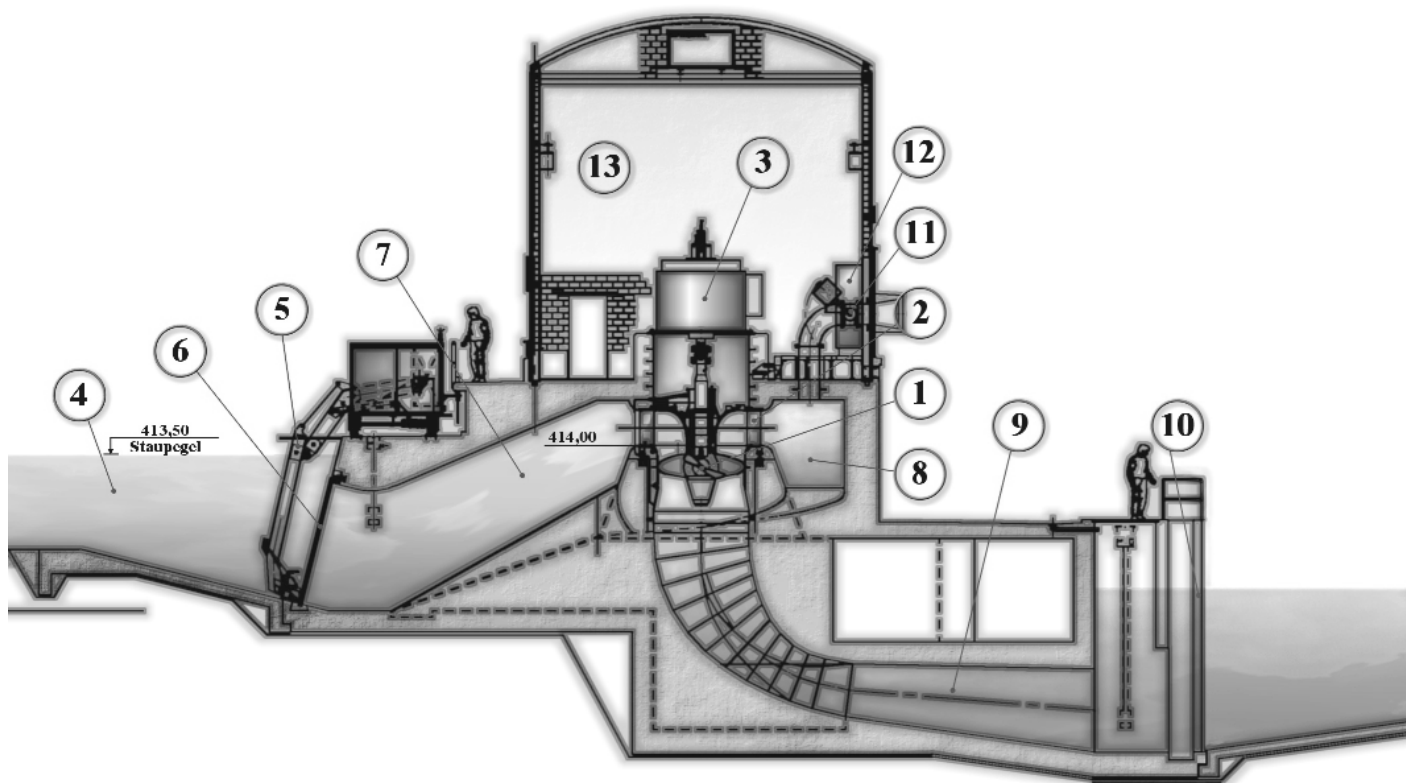
² Bei einem Leitapparatdurchmesser der Grössenordnung von zwei bis drei Metern wie in diesem Projekt bringen fixe Schaufeln grosse Kosteneinsparungen. Grundsätzlich wäre auch ein Fixieren der Laufschaufeln bei regulierbaren Leitschaufeln möglich - die Turbinenlieferanten haben jedoch erstaunlicherweise keine entsprechend interessante Angebote gemacht. Dies ist offenbar eine Frage der Gestaltung und der Grössenreihen der Standardturbinen.

6 Die Saugheberlösung

Teure Schützen und Leitapparat:

Leitapparate für Niederdruckturbinen und Schützen resp. Dammbalken sind verhältnismässig teuer. Verzichtet man auf eine Regelung der Leitapparate, so wird ein Saugheber-Einbau wirtschaftlich

Interessant, weil nur mit dieser Anordnung vollständig auf Abschlussorgane verzichtet werden kann und somit der Leitapparat auch mit unregulierten Schaufeln ausgerüstet werden kann.



- (1) Hochleistungs-Laufrad mit vier regulierten Schaufeln, CuAl-Bronze
- (2) Lufteintritt zum Belüften (Abstellvorgang)
- (3) direktgekoppelter, langsamlaufender Synchrongenerator
- (4) Oberwasser, Staupegel konstant
- (5) fahrbare hydraulische Rechenreinigungsmaschine
- (6) Einlaufrechen
- (7) Saughebereinlauf
- (8) Hochleistungs-Einlaufspirale
- (9) Hochleistungs-Saugrohr
- (10) Dammbalkennuten (1 Set Dammbalken für 3 Turbinen)
- (11) Belüftungsklappe
- (12) Schaltschränke
- (13) Hallenkranbahn

Die Leitschaufeln wurden mit fest verschweissten Schaufeln, d.h. mit definitiv fixierten Anstellwinkeln ausgeführt. Dies ist unter drei Voraussetzungen zulässig:

- erstens müssen das Nutzgefälle, der Wasserstrom und deren Variation zuverlässig bekannt sein,
- zweitens dürfen sich diese Charakteristiken im Laufe der Lebensdauer der Turbinen nicht verändern,
- und drittens muss der Turbinenlieferant über zuverlässige Modellmessungen und grosse Erfahrungen im Übertragen dieser Messungen auf die Grossausführung verfügen (sogenannte Aufwertung).

Dieses Anschweissen verbilligte nicht nur den Fabrikationsprozess, sondern erlaubte auch einen bedeutend einfacheren Kräftefluss im Gebäude.

Aus der fixen Stützschaufelreihe und der nachfolgend angeordneten regulierenden Leitschaufelreihe der Originalturbine von Professor Kaplan wird bei den Maschinen in Perlen eine einzige Reihe von Stützschaufeln (oder Leitschaufeln). Hydraulisch verändert sich die Turbine weder durch die fixen Leit- und Laufschaufeln noch durch die Saugheber-Anordnung. D.h. die Wirkungsgrade sind identisch jenen der doppelregulierten Turbine beim gleichen Einstellpunkt.

Für Inspektionen und Revisionen der Turbinen müssen keine Entwässerungen vorgenommen werden, was Betriebskosten spart. Auf oberwasserseitige Revisionsabschlüsse kann gänzlich verzichtet werden, da für diese sehr seltenen Fälle ein Schliessen des Kanaleinlaufes und entleeren des Kanals möglich ist. In Perlen brachte dies nicht nur das Wegfallen von drei grossen Schützen, sondern auch bauliche Vereinfachungen. Als Abschlussorgan genügt ein einziges Set unterwasserseitiger Dammbalken, zum Beispiel um Arbeiten am Saugrohr durchzuführen.

Entlüften zum Anfahren:

Um eine Turbine anzufahren, evakuiert eine Wasserring-Vakuumpumpe in etwas über 10 Minuten die notwendige Luftmenge aus dem "Dom" der Einlaufspirale, hebt den Wasserspiegel ca. 60 cm an und lässt erstes Wasser auf das Laufrad fallen. Die Turbinen beginnen zu drehen, reissen weitere Luft mit und springen in wenigen Sekunden an. Restluft bleibt keine zurück.

Inzwischen hat die Automatik den Generator bei Nenndrehzahl bereits auf das Stromnetz geschaltet, öffnet das Laufrad weiter und unterstellt die Gruppe schliesslich dem Verbundrechner der Zentrale mit dem vollautomatischen, wasserstandsgeordneten Betrieb.



Die Anlagenkosten der Zentrale WTA-PF konnten mit der konsequenten Saugheber-Anordnung um rund einen Fünftel gesenkt werden.

Luftklappe öffnen für Schnellstop:

Die Turbinen werden mit Schliessen der Laufräder stillgesetzt. Ein grosser Vorteil des Vollheber-Einbaus zeigt sich bei einer Schnellabschaltung. "Luftklappe auf" - Sekunden später ist die Wasserlast von der Turbine abgefallen. Der Wasserspiegel in der Spirale pendelt gegen den Oberwasserstand, die Maschinengruppen laufen in Luft aus und werden von der Stillstandsbremse gesichert.

Da alle Armaturen in die programmierbare Vollautomatisierung eingebunden sind, können verschiedenste Abschaltfälle optimal abgedeckt werden. Die Luftansaugleitung wird nach aussen geführt - dass einem Monteur beim Abstellen der Turbine die Kappe in die Belüftungstrompete gesaugt wird, kann seit Montage der Schutzhauben nicht mehr passieren ...



So einfach das mechanische Maschinenkonzept ist - bei der Energieproduktion wurden keine Abstriche in Kauf genommen. Im Gegenteil: ambitionöse Garantien forderten den Hersteller heraus, Spitzenhydraulik für die Einlaufspirale, das Laufrad und das Saugrohr einzusetzen. Die Grundsätze der optimalen hydraulischen Formgebung sind die gleichen wie bei einem konventionellen Einbau.

Mit einer anspruchsvollen Leittechnik werden alle denkbaren Betriebszustände beherrscht und die Energieproduktion optimiert.

7 Weitere Bausteine zu einem effizienten Gesamtkonzept

Auf Nebenschauplätzen Energie gewinnen:

Die Ertragsstudie zeigte Mängel bei der Fassung auf: Die konzedierte mittlere Wassermenge von $45 \text{ m}^3/\text{s}$ konnte erst bei einem beträchtlichen Überstau und Wasserverlust über das Wehr erreicht werden. Ein Ausräumen des Kanals und die Sanierung zerfallender Abschnitte der Uferbefestigung genügten nicht. Der Einlauf erwies sich als strömungsungünstig. Deshalb wurde ein Ausbaukonzept erarbeitet, welches die Fassung der Konzessionswassermenge unter Einhalten des konzedierten Stauzieles ermöglicht, ohne Veränderungen am Reusswehr oder an der Konzession vorzunehmen.

Die Sanierung brachte gerundete, breitere Einläufe mit automatischen Schützen, welche nicht mehr dauernd für den Überflutschutz des Kanals eingetaucht bleiben müssen, sondern von der Portierloge aus überwacht und nur bei Bedarf heruntergefahren werden.

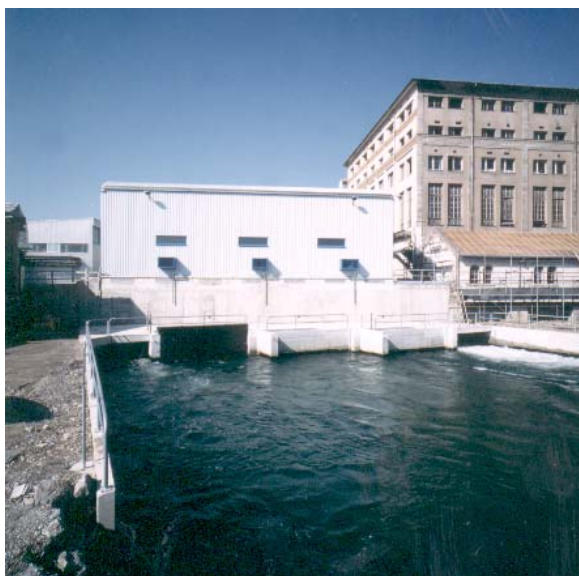
Auch die Wehrschützen rüstete man für eine Automatisierung nach und bezog sie in die Regelung ein. Der Kanal ist nun besser gegen Überflutung geschützt. Es wurden weitere Schwachpunkte der alten Fassung saniert: die Gefährdung des Betriebspersonals beim Bedienen der Einlaufschützen vor Ort, das Einklemmen von Treibgut in den zu engen Schützenfeldern und das unschöne Herumtreiben von Gschwemmsel vor den Schützen. Das Treibgut wird in den Kanal eingeschwemmt und mit den automatischen Rechenanlagen entnommen. Der Betriebswassergewinn kommt beiden Anlagen zu gut und erhöht die Gesamtproduktion um über 5 %.

8 Spielverderbende Asymmetrien verhindern

Je niedriger das Nutzgefälle, um so kleiner sind die Strömungsgeschwindigkeiten durch das Laufrad. Unregelmässigkeiten in der Anströmung können deshalb Geschwindigkeitskomponenten verursachen, welche die Anströmwinkel auf die Laufschaufeln verfälschen. Die Wirkungsgrade der Ultra-Niederdruck-Turbinen sind deshalb höchst empfindlich auf Fehlanströmungen und auf Störungen in der Abströmungen.



Diesem Risiko begegneten die Planer mit einer verbesserten Gesamtanordnung: Gegenüber der alten Anlage wurden die Turbineneinläufe in die Mitte des Kanales gebaut mit je einer Entlastungsklappe links und rechts davon und die Einlauffläche wurde grosszügiger gewählt.



Auch Rückwirkungen von der Unterwasserseite her können stören. Die Hydrauliker fürchten Strömungsabrisse in den bezüglich Wirkungsgrad hochgezüchteten Saugrohren. Deshalb wurden die Ausläufe so gut wie möglich in die Strömungsrichtung gedreht.

Bei Kleinkraftwerken ist man versucht, mit einfachen Einlaufkonturen Kosten zu sparen: Bekannt sind die seit mehr als einem Jahrhundert üblichen Wasserkammern anstelle von optimierten Einlaufspiralen. Bei Nutzgefällen über 3 Meter, sehr kleinen Turbinen und einer auf diese Einbauart optimierten Turbinenhydraulik mag die Wirkungsgradeinbusse tragbar sein, resp. die Lösung bleibt noch wirtschaftlich.

Im vorliegenden Falle erreicht der Laufraddurchmesser jedoch fast die Grössenordnung des Nutzgefalles, weshalb eine Einlaufspirale mit Hochleistungshydraulik grossen Nutzen bringt: Sie bringt nicht nur eine homogene Geschwindigkeitsverteilung über dem gesamten Umfang, sondern optimiert auch das Geschwindigkeitsprofil im Querschnitt senkrecht zur Fliessrichtung.

Die Einlaufspirale - im Betrieb leider nicht einsehbar - besticht durch ihre Ästhetik.



Die symmetrische Anströmung und die ungestörte Abströmung sind damit optimal - dennoch sind kleine Unterschiede im Betrieb der drei Turbinen bemerkbar!

9 Konzept für einen kostengünstigen Betrieb

Generator - der Langsame punktet wieder:

Ein weiterer Schauplatz der Optimierung waren die Synchrongeneratoren. Grosse, gemächlich und leise laufende Schirmgeneratoren produzierten vor einem Jahrhundert den ersten Strom aus Niederdruck-Kraftwerken. In den letzten Jahrzehnten kamen bei Kleinwasserkraftwerken vermehrt kostengünstige, schnellläufige Standardgeneratoren mit hohen Wirkungsgraden und kleinen Abmessungen auf. Die Langsamläufer verschwanden in der Mottenkiste. Für die Drehzahl-erhöhung wurden Getriebe eingesetzt. Getriebe und Generatoren heutiger Bauart erzeugen jedoch einen beträchtlichen Lärm und die Getriebe verursachen zudem den bei Fabrikumnutzungen gefürchteten Körperschall.

Innovative Generatorhersteller haben in den letzten Jahren das Rad der Zeit zurückgedreht. Zum Zeitpunkt der Bestellung waren die langsamlaufenden Generatoren bereits soweit entwickelt worden, dass sie gegenüber Schnellläufer-Generatoren mit Getriebe in Preis und Wirkungsgrad konkurrenzfähig waren.

Die drei elektrischen Elefanten, welche schliesslich bestellt wurden, bringen in Perlen je 15 Tonnen auf die Waage. Doch das Gewicht täuscht: Entgegen der landläufigen Meinung ergibt die grosse Generatorschwungmasse wegen der kleineren Drehzahl keine grössere Drehzahlstabilisierung der Turbinen - die auf die Turbinenwelle bezogene Rotationsenergie der Drehmassen ist sogar etwas kleiner als im Falle mit Getriebe. Dies erklärt sich mit der Formel für die Rotationsenergie: Die Drehzahl fliesst im Quadrat ein, die Masse und das Massenträgheitsmoment hingegen nur linear.



Die Generatoren sind für Phasenschieberbetrieb ausgelegt, d.h. für die Verbesserung der Blindstromverhältnisse ($\cos \varphi$) des Fabriknetzes, anstelle von Kondensatorkapazität.

Man darf sich allerdings nicht der Illusion hingeben, die neuen Langsamläufer seien so flüsterleise wie ihrer Vorläufer, die alten Schirmgeneratoren. Leider geht das Trimmen auf einen Spitzenwirkungsgrad bis heute nicht ohne Preis bei den Schallemissionen.

Sichere und kostengünstige Stahlwasserbauten:

Bei Turbinenschliessen und Überwasserstand muss das Kanalwasser um das Kraftwerk herum geleitet werden. Da im Überflutungsfalle ein beträchtliches Schadenpotential besteht, wurde die Entlastung nach der Sicherheitsregel "n+1" von grösseren Kraftwerken mit zwei Bypassklappen und einer fixen Notüberfallkante ausgelegt. Wenn eine der zwei Klappen das Öffnen verweigern sollte, kann das maximal mögliche Kanalwasser durch eine Klappe und den fixen Überfall abgeführt werden. Die Klappensteuerung wurde in die programmierbare Kraftwerksregelung eingebunden.

Die Rechenreinigung - welche bis zur Stilllegung noch manuell erfolgte! - übernimmt eine fahrbare Rechenreinigungsmaschine. Die Harke ist als ölhydraulischer Greifer ausgebaut, und für sperriges Schwemmgut dient ein separater Baggergreifer. Die Entsorgung erfolgt nach der Zwischenlagerung in einem Deponiefeld, wo auch Mulden hingestellt werden können.



Kosten bei den Baumeisterarbeiten tief halten:

Gut konzipiert ist noch nicht kostengünstig gebaut! Ein gerafftes Bauprogramm, unzählige Kleinoptimierungen und eine straffe Bauleitung ermöglichten eine kurze Bauzeit von nur 15 Monaten.

Erschwerend war die Auflage, den Kanal möglichst lange weiter zu betreiben, damit der Energieproduktionsausfall der oberliegenden WTA-HF tragbar blieb. Wurde der Kanal abgestellt, so war eine Dotierung mit Restwasser und eine entsprechende Durchleitung durch die Baustelle notwendig.

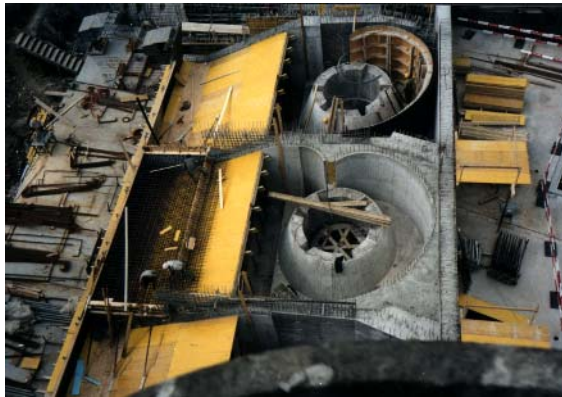
Unterbrochen wurden die Bauarbeiten nur wegen einer Woche sehr intensiven Schneefalls und wegen dem Extremhochwasser im Mai 1999, als die Baugrube gemäss dem Notfallkonzept geräumt und gezielt geflutet wurde.



Der Kanalbetrieb und der durchlässige Baugrund erforderten zwei Bauetappen und eine gesicherte Baugrube mit Wasserhaltung. Im Schutz der Grube konnte konventionell gearbeitet werden.

Holzschalungen für Einmalgebrauch:

Für die ein- und zweidimensional gekrümmten Schalungen der Einlaufspiralen und Saugrohre erwiesen sich verlorene Schalungen gegenüber anderen Konzeptionen als wirtschaftlicher.



Die Schalungen gleichen Holzskulpturen. Es sind Kunstwerke, muss doch nicht nur die Form genau eingehalten werden, sondern auch eine vorgeschriebene Oberflächenqualität garantiert werden.



Entflechtung der Nutzungen:

Die vielen am alten Maschinenhaus angebrachten Werkleitungen, deren Bruchrisiko den Ausschlag für die Neubauvariante gegeben hatte, wurden auf der Unterwasserseite des Kraftwerks auf einen verstärkten bestehenden Rohrleitungssteg verlegt. Der Fussgängerübergang vor dem ehemaligen Maschinenhaus wurde neu eingerichtet und von den Kraftwerksanlagen abgetrennt. Dadurch ist das Maschinenhaus heute von allen anderen Nutzungen entflochten.

10 Minimale Umweltauswirkungen

Bei Wasserkraftwerken stellt sich immer die Frage nach den Umweltauswirkungen und nach den behördlichen Auflagen. Mit einer Umweltrelevanzmatrix konnte einerseits aufgezeigt werden, dass die Auswirkungen klein sind und sich andererseits auf wenige Punkte konzentrieren. Ein Aufheben des Ausleitungskanals kam wegen der Vorfluterfunktion und wegen des oberliegenden Kraftwerkes nicht in Frage. Die Lösungen wurden in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden und den lokalen Fischern getroffen.

Die **Auswirkungen auf das Gewässer** wurden minimal gehalten. Das Baukonzept reduzierte Arbeiten im Wasser auf ein Minimum. Für die jeweils bis einige Wochen dauernden unumgänglichen Betriebsunterbrüche des Ausleitkanals wurde jeweils ein Ausfischen organisiert, das Wasser langsam abgesenkt und eine Restwasserdotierung eingebaut. Die Maschinen werden mit biologisch abbaubaren Schmiermitteln und Hydrauliköl der Wassergefährdungsklasse Null betrieben. Das Turbinen-Radiallager wird wassergeschmiert. Die lange Lebensdauer der Anlage und die geringen Unterhaltsaufwendungen runden das Bild einer guten Gesamtumweltbilanz ab.

Auch wenn heute die vielfältigen Geräusche der Papierfabrik rund um die Uhr (ausser an wenigen Tagen im Jahr) jegliche Kraftwerksgeräusche übertönen, wurde dennoch auf **minimale Lärmemissionen** geachtet. Die langsamdrehenden vertikalen Einheiten und der direktgekoppelte Generator vermindern den Lärmpegel schon an der Quelle. Im weiteren wurde die Maschinenhauskonstruktion und die Lüftung derart konzipiert, dass mit Sicherheit eine Störung der nahe liegenden Wohnhäuser unmöglich ist.

11 Resultate und Fazit

Die Inbetriebsetzung erfüllte alle Erwartungen. Die Garantien für Wirkungsgrade, Leistungen und Schallemissionen wurden auf Anhieb erreicht, und die Funktion lässt bis heute nichts zu wünschen übrig. Das moderne Maschinenhaus fügt sich bereichernd in den Kontext der Industriebauten der Papierfabrik ein, und innen besticht der Maschinenraum durch seine Grosszügigkeit und die übersichtliche Anordnung aller Elemente und Leitungen.

Das zuverlässige, wirkungsgradoptimale und kostengünstige Konzept bringt nicht nur eine optimale Nutzung des Potentials erneuerbarer Energie, sondern erlaubt auch einen wirtschaftlichen Betrieb. Es zeigt, dass heute wieder Ultra-Niederdruck-Kraftwerke erstellt werden können, die elektrische Energie zu einem konkurrenzfähigen Preis gegenüber der Beschaffung aus dem Netz erzeugen. Voraussetzungen sind kostengünstige innovative Konzepte, straffe Planung und angemessene Amortisationszeiten.

Das innovative Konzept wurde vom Bundesamt für Energie als Demonstrationsanlage unterstützt. Die 7.8 Millionen Kilowattstunden Jahresproduktion mit gutem Winteranteil stellen einen willkommenen Beitrag an die Zielerreichung von Energie 2000 dar. Die ohne Sanierung des Kanals aufgewendeten Anlagenkosten für die WTA-PF von 8 Millionen Franken ermutigen zum Erneuern ähnlicher Anlagen.

Anlagenkennwerte:

Bruttogefälle (= ungefähr Nettogefälle)	2.7 m (variierend von 2 m bis 3.4 m)
Nenn-Wassermenge	3 * 15 m ³ /s (45 m ³ /s an rund 300 Tagen vorhanden)
Schluckfähigkeit der Anlage	48 m ³ /s
Elektrische Maximalleistung	3 * 342 kW _{el} = 1026 kW _{el}
Synchrongeneratoren	3 * 440 kVA / 500 V / 125 min ⁻¹
Gruppenwirkungsgrad bei Nennlast	86 % (cos φ = 1.0)
Laufgrad-regulierte Kaplanturbinen	2'100 mm, 4-flügelig, CuAl-Bronze
Wellen und Lager	vertikalachsig, Turbine und Generator direktgekoppelt
Saugheberbauweise	50 cm über Oberwasserspiegel
Mittlere jährliche Produktionserwartung	7'800'000 Kilowattstunden

FOTOS AUS DER BAUPHASE:



ANHANG

Hydraulische Eigen-Stromerzeugung im Jahr 2000

ANLAGE	WTA-PF	WTA-HF	TOTAL
Monat	kWh	kWh	kWh
Januar	719'172	700'900	1'420'072
Februar	698'694	633'000	1'331'694
März	711'182	695'200	1'406'382
April	625'506	627'900	1'253'406
Mai	716'074	711'600	1'427'674
Juni	642'456	657'100	1'299'556
Juli	667'096	584'200	1'251'296
August	718'772	627'900	1'346'672
September	626'826	639'100	1'265'926
Oktober	725'644	676'300	1'401'944
November	725'964	659'700	1'385'664
Dezember	708'400	659'100	1'367'500
Total 2000	8'285'786	7'872'000	16'157'786
in %	51.28%	48.72%	100.00
Durchschnitt Monat	690'482	656'000	1'346'482
Winter	4'289'056	4'024'200	8'313'256
Sommer	3'996'730	3'847'800	7'844'530

Bauzeit:

1999 Total	0	2'290'300	2'290'300
-------------------	----------	------------------	------------------

WTA-PF: Wasserturbinenanlage Papierfabrik

WTA-HF: Wasserturbinenanlage Holzfabrik (Oberlieger)

ANHANG / ANNEXE

RESUME : Petite centrale de Perlen: aménagement économique ultra-basse chute grâce à des turbines à siphon

En Suisse, les petites centrales à basse chute abandonnées ou vétustes présentent un potentiel d'énergie considérable qui n'est pas exploité. L'installation hydro-électrique de 1 MW de la fabrique de papier de Perlen montre que des principes novateurs et une planification systématique permettent une rénovation rentable d'installations destinées à l'autoproduction des industries. Pour la première fois, on utilise en Suisse une installation à siphon avec des turbines à régulation simplifiée et avec une conception conséquemment économique.

Il est apparu, en étudiant diverses variantes, que trois turbines Kaplan à simple réglage étaient plus économiques qu'une ou deux à double réglage.

C'est la première fois en Suisse qu'on fait appel à des turbines à siphon sans organe d'obturation: l'amorçage du siphon et, par conséquent, le lancement des turbines est assuré par de petites pompes à vide; l'arrêt complet et rapide est obtenu par l'ouverture de vannes d'aération.

Ce concept a permis d'économiser environ 20% du coût global (8 millions Franc suisses).

L'apport d'eau du canal étant quasiment constant, il a été possible d'utiliser des distributeurs à aubages fixes, sans perte de production. Sans distributeurs réglables et sans vannes les frais d'exploitations sont plus basses.

Les profils hydrauliques à haute performance de la bêche spirale, de la roue motrice et de l'aspirateur permettent d'obtenir un rendement énergétique élevé. Par ailleurs, on a opté pour des générateurs à basse vitesse de rotation et à couplage direct, ceux-ci ayant vu récemment leur prix baisser et leur rendement augmenter.

Toute simplification de construction se faisait sans aucun compromis avec le rendement énergétique ou la disponibilité annuelle de l'aménagement. Avec une rénovation de la prise d'eau le coût et les risques d'opération sont diminués, et le débit intégral annuel est augmenté de 5 %. La production annuelle atteint 8 millions kilowattheures. Le prix de revient du kilowattheure du nouveau aménagement ainsi résulte très favorable.

Caractéristiques principales de l'installation:

Dénivellation (= pratiquement hauteur de chute nette):	2,7 m (2,0 à 3,4 m)
Débit nominal:	3 x 15 m ³ /s
Capacité de débit instantané de l'installation:	48 m ³ /s
Puissance électrique maximale:	3 x 342 kW _{él} = 1'026 kW _{él}
Générateurs synchrones:	3 x 440 kVA / 500 V / 125 t /min
Rendement du turbo-groupe	86% à charge nominale (cos φ = 1,0)
Roue motrice Kaplan à pales réglables:	DR = 2'100 mm, 4 pales, Bz CuAl
Arbre moteur:	Axe vertical, accouplement direct
Construction du siphon:	50 cm au-dessus du niveau amont
Production annuelle moyenne attendue:	7'800'000 kWh

ANHANG / ANNEX

SUMMARY : **Harnessing ultra low head hydro in an economical way**

In Switzerland, a remarkable amount of energy-potential exists at low-head hydro power plants which are currently out-of-service or obsolete. The example of the recently reconstructed ultra-low-head power plant in Perlen shows that, with an innovative technology, renovation can be economic, even in the context of industrial self-consumption and low energy purchase prices. At Perlen a 1 MW SHPP with single-regulated turbines in a consequent siphoned economic concept was installed for the first time in Switzerland.

Surprisingly enough, pre-feasibility studies revealed that rather than one or two horizontal turbines, the optimal solution here would be three vertical-shaft units - mainly because civil engineering **and** mechanical equipment would be much simpler.

The overall cost saving by the simpler mechanical concept, avoiding guide vanes regulation, gates and piers, resulted in 20 % lower costs. All savings were achieved without any compromises in efficiency, annual production or operation costs. The operation costs are considerably lower than with "classic" double regulated Kaplan turbines.

With the siphon concept, the highest point of the turbine inlet is located above head-

water level. As a result, no water can flow into the turbine except when needed. A small size standard vacuum pump is enough to suck in water ready for startup. The water level in the spiral casing is so increased till the water drops on the runner and the turbine begins to turn. It sweeps further air and the start up is completed within a few seconds. The turbine can be put out of work by closing the runner blades. Emergency stops can be effected by opening the air valve: in a few seconds the water level in the spiral casing falls to the headwater level; the turbine runs out in air and is secured by a brake.

By renovating the headwater canal and the intake at the same time, operation risks were lowered. With an improved intake shape the annual water intake has been increased by more than 5%. To make best economic use of the innovative concepts, a stringent time scheduling, numerous small optimisations and a constant supervision were necessary.

The commissioning fulfilled all expectations. The guarantees for efficiency, performance and sound-emission were reached immediately and the plant works without any problem.

Data:

Gross head	2.7 m (2 to 3.4 m)
Nominal water flow	3 * 15 m ³ /ses
Maximum electric output	3 * 342 kW _{el} = 1026 kW _{el}
Synchronous generators	3 * 440 KVA / 500 V / 125 MIN-1
Group-efficiency at nominal load	86%, cos φ = 1.0
Runner-regulated Kaplan-turbines	2'100 mm, 4 blades, CuAl - Bronze
Shaft and bearings	vertical, shaft, directly-coupled generator
Siphon setting	50 cm over head water level
Mean production	7'800'000 kWh / as

From the source of local wealth to a rehabilitation-object

In the last century innovative entrepreneurs laid the foundations for the industrial age in Switzerland with hundreds of SHPP's. Most were built on low-head sites and often only used the low season part of the river flow. This hydraulic potential determined the location of many industries, where today sometimes only a street name remains to commemorate a former power plant.

Generally, each kilowatt-hour becomes more expensive the smaller the plant capacity and the lower its head. Accordingly, it is unsurprising that in former times with the euphoria for low-price energy, many ultra-low head small hydro power plants were shut down as soon as the end of the technical life span was reached. Then, when renewable energies acquired a new esteem, various installations were rehabilitated based on idealistic motives, despite a lack of economic rationale. Others survive economically because the robust machines have not yet reached the real end of their lives and, with a strategy of minimal investment, they continue producing, but with progressively reduced production and escalating personnel costs. In such cases, any expensive incident or repair can lead to the shut down of the plant. The profitability of a rehabilitation project and the political-economic framework conditions decide if this "end" is definitive or if the potential will be harnessed for another working life.

The power plants of the Perlen Paper Mill on the river Reuss in canton Lucerne, Switzerland, correspond to this type. They are situated on a factory-owned diversion canal 3.2 kilometers long with two small hydro power plants built in series as run-of-the-river plants, each with a head of 2.7 m and each providing approximately 1 MW of power. The plants were built in the middle of the 19th century by Theodor Bell, a Swiss industrialist, and were regarded as a pioneer venture.

The far-sighted builders planned for extensions in stages, which followed soon after the initial construction. The electrification of the "small hydro power plant paper mill" took place in the beginning of the last century, with the installation of four new 'generator-turbines" made by Voight. In parallel with them three new turbines were installed, also purely mechanically driving a common king-shaft. The belt-drives milling-machines for the material-preparation, so-called Hollander, were driven through this main shaft,. In the 1940s, the shaft was coupled to a generator, and since then the small hydro plant has successfully been in service without significant investment.

Renovation or decommissioning?

A small hydro plant for the wood factory just upstream had been completely rebuilt in 1981 and equipped with a single tubular S-turbine for 45 m³/s. This double-regulated Kaplan turbine with a 3.2 m-runner has a rotation speed of only 103 rpm and drives a synchronous generator of the speed 1000 min⁻¹ via a two-stage gear. The modern, compact powerhouse has no crane and for major maintenance works the machine has to be lifted out using a mobile crane.

Downstream is the "Paper mill small hydro plant". During one human lifetime, the extremely heavy and slow turning runners, gears and generator windings had served reliably without major incident or need for reinvestment. *[Illustration: photo old generator]*. In the 1980s, mechanical problems became frequent and, one by one, the turbines were shut down. Repair or renovation was out of the question because of low efficiencies, high costs and personnel-intensive operations involved. At the beginning of the 1990s, the plant was decommissioned.

A surprising optimum solution

Subsequently, a pre-feasibility study reviewed optimal solutions taking into account all the possibilities including demolition, upgrading, replacing and reconstruction. Since all energy generated was consumed by the paper mill, any refurbishment had to compete economically with the low energy purchase prices available to a large customer.

The results were remarkable: a concept with a single machine based on the law of economies of scale proved not to be economic. A solution with two turbines resulted in more expensive turbine costs and with high civil construction costs because of the depth and length of the building. Since the reconstruction of the wood factory plant in the 1940s, the small turbine market has developed considerably and eventually it proved that even that a concept with two horizontal shaft turbines was less attractive than three turbines with vertical shafts for which simpler construction would be possible.

Finally, a potential solution based on minimal structural changes, and the installation of seven, speed-regulated compact submerged turbines constructed using pump technology, without mechanical regulation of vanes and blades, or seven tubular syphon-turbines, proved more expensive than the classic solution with three vertical Kaplan turbines. Furthermore, the classic solutions would produced more energy.

The management of the paper mill therefore decided in favor of the total reconstruction of the plant, with three vertical Kaplan-turbines in a generously proportioned powerhouse.

Gain in energy

A study of energy production showed that the intake was far from perfect. The licensed mean water flow of 45 m³/ses could only flow into the plant at water levels considerably higher than the license

level, with a permanent water loss over the weir. Cleaning and repair of the head race canal proved ineffective, as the intake flow proved to be unfavorable. An extension concept was worked out without changes in the conditions of the weir and the water license.

The redevelopment project introduced wider and rounded intakes with automatic gates. Previously, for flood protection reasons, the intake gates had to be permanently submerged into the water, causing head losses and retaining debris. The new gates and the existing weir are now fully automatic and remote controlled. Further weak-points of the old situation were improved including removal of the danger to staff associated with the manual operation of the old gates during times of flood risk, less chance of debris jamming under the gates and removal of the esthetic nuisance of accumulated floating debris in front of the weir and the intake gates. Any floating debris is now drawn into the canal and is removed at the power plant with automatic rack cleaning device. The annual water intake has increased by more than 5%.

Refinements following inputs from the market

Evaluation of the construction risks and associated tenders prices for civil construction showed that renovation of the old brick powerhouse would not be a good solution compared to a new powerhouse.

In addition, tenders for the turbines pointed unequivocally towards single-regulated Kaplan turbines. The water flow is quite constant and, with three turbines, the disposal of the energy produced is secure. With the possibility to fix the guide vanes, a syphon arrangement was selected [*illustration: longitudinal-cut*].

It also transpired that with the fixed and well known hydraulic conditions at the site the guide vanes could be welded with fixed pitches as the turbine manufacturer provided reliable model test records and experience with up-scale up. This also simplified the foundation forces, which are now conveyed directly through the guide vanes. Hydraulically, the syphon concept does not change the flow and the geometry. For turbine overhauls, no drainage will be necessary - which is an attractive feature applicable not only to a small plant but also to larger plants. The Turbine gates are superfluous, and this allows simplifications in civil construction; one set of stoplogs is enough for possible future works in the spiral casing or in the draft tube.

In summary, the syphon concept lowered the total cost of the power plant by approximately twenty per cent.

Evacuation for start up

To start up the turbines, a water-ring vacuum pump evacuates the required quantity of air from the upper space in the spiral casing. After about 10 minutes the first water drops on to the runner *[photo: evacuation installations]* and the turbine begins to turn. It sweeps further air and starts in a few seconds. Normally no air remains. The following process does not differ from conventional electromechanical equipment. When switched to the electric grid, the plant operates completely automatically.

Air-valves for emergency stop

The turbines can be put out of work by closing the runner blades. A major advantage of the syphon-mounting relates to the case of emergency stop when, with a quick opening of the air valve, a few seconds later the water load drops and the water level in the spiral casing falls to the headwater level; the turbine runs out in air and can be secured by a brake. Since all valves are connected to the automatic control system, most cases of stopping

can be programmed in an optimal way. The air duct leads outside and as a protection shield was installed, a mechanic's hat can no longer be sucked into the duct when stopping the turbine!

Components to an efficient total-concept

Although the mechanical concept is simple, there have been no compromises on energy production. On the contrary, stringent and guaranteed demands challenged the manufacturer to offer the best hydraulic conditions for the spiral casing, the runner and the draft tube. *[Photos: spiral casing, runner and draft-tube]*

With ultra-low-head turbines, a symmetrical intake flow and an undisturbed outlet prove determining factors for efficiency. Therefore, the new powerhouse was built in the middle of the canal, and the outlets were turned directly into the direction of the current. In spite of this symmetrical layout, small differences are noticeable in the behavior of the three turbines.

Generator: the return of slow speed

The synchronous generators were another area for optimization. A century ago, large umbrella generators produced the first energy from low-head plants. In the last decades standard generators with high efficiencies and high speed increasing gears have displaced these heavy machines.

Innovative generator manufacturers have recently turned back the wheel of time. Slow running generators have been developed which are competitive in terms of both price and efficiency, even without considering the damage-risks and other qualitative criteria in favor of the low speed generator. *[Photo generator]*

Each of the three electric elephants weighs 15 tons. However, weight can be deceptive: contrary to common opinion the flywheel effect of a light high speed generator reduced to the low rotation speed of the turbine axes would have led to the same result.

Safe and advantageous steel-water structures

At times of shutdown of the turbines or during floods, the water flows have to be evacuated safely. Since a considerable flood risk exists, the bypass was planned with the Swiss n+1 -rule normally applied to large powerplants. Two bypasses with overflow gates and a fixed emergency overflow were installed. If one of the two valves fails to open, the water can still be evacuated.

For rack cleaning (formerly still done manually!), a mobile rake-cleaning machine was installed. The rake is equipped with a hydraulic grab and a separate larger grab to deal with bulky debris.

Controlling civil construction costs

A well conceived scheme may not be automatically economically sound. Stringent time scheduling, numerous small optimizations and constant supervision made a short construction period of only 15 months possible, despite the condition that the canal had to remain in operation as long as possible to minimize the energy loss of the wood factory plant. The civil works were only interrupted twice: once because of flood when the excavation (in accordance with emergency regulations) was subjected to a controlled flood, a second time because of a week of very intensive snowfall.

Two construction sections were necessary because of permeable ground and the operation of the canal. Sheet piles protected the excavation and construction continued in a conventional way. Wooden formwork for the one- and two dimensionally angled geometry of the spiral casings and draft tubes proved to be the most economic solution for concrete construction. *[photo: formwork of draft-tube and of spiral casing]*

Separation of utilities

The old powerhouse was used as a bridge over the canal for steam, water, waste water pipes and electrical cables. They were all transferred to a separate pipe

bridge downstream. A footway remained in front of the powerhouse but was separated from the powerhouse and the rake cleaner.

Low environmental impact

The concept adopted reduced underwater works to a minimum. Fish were caught and a residual flow had to be left in the canal throughout the whole construction period. The machines are driven with biodegradable lubricants and oil, and the turbine bearings are water-lubricated. The long lifespan of the installation and the low operation measures complete the picture of a good ecological lifecycle balance.

Results and result

The commissioning fulfilled all expectations. The guarantees for efficiencies, performances and sound-emissions were reached immediately and the plant works functioned without any problem. The modern powerhouse fits esthetically into the context of the industrial buildings of the paper mill. Indoors the generous amount of space and the simple layout facilitate operation and maintenance.

The reliable, efficient and low cost concept represents not only an optimal use of the potential available, but also economic operation. It shows that ultra-low-head power plants still can be implemented, in competition with procurement by big large consumers of electricity from the grid at low prices. The necessary factors are cost control concepts, tight planning and appropriate amortization periods.

The innovative concept was supported by the Swiss Federal Office for Energy as a demonstration project. The 7.8 million kilowatt hours produced annually represent a welcome contribution to the goal-attainment of Swiss Energy 2000 programme. The overall costs of CHF 8 million (about US\$ 4.7 million) for this run-on-the-river plant (without any canal and intake costs) encourage similar projects to be developed in the future.

The principle of syphon turbines

In a syphon-turbine the inlet flow is over a raised cross-section with the deepest point over the head-water level. When the unit is out of operation no water can flow to the turbine runner, so that vanes or other closing elements are not necessary. If the water flow is quite constant, the pitch of the guide vanes can be fixed. The inlet geometry can be a spiral casing, a water flume or a pipe. A most important feature is that all elements must be air-tight and a diving-nose is used to secure the inlet against air-penetration.

To start the turbine, the water level is lifted with a partial vacuum. This can be done with a vacuum-pump, with the advantages of short time and programmable regulation. The evacuation lasts only a few minutes. Especially with small turbines, hydraulic ejectors are also suitable. These have the advantage that they contain no rotating parts and require no electric energy for a black-start. With especially favorable head-water conditions, the head-water level can also be lifted with bypass vanes to allow water to flow into the turbine.

With vertical shaft units, an height increase of only a few per cent of the runner-diameter over the lower guide-vane ring is sufficient to start the turbine. The water falling on the runner sweeps air through the draft-tube and accelerates the evacuation-process, so that the turbine starts in few seconds and reaches full synchronous speed.

The following process does not differ from conventional electromechanical equipment: synchronizing, switching to the network, opening of the runner and subordination to the power plant controls. The concept is recommended for automatic operation, e.g. with head-water level control. For operation in an isolated electrical grid it is less favorable. If the inlet geometry is suitably adapted, in normal operation the remaining air is flushed completely. The remaining air can also be pumped off.

If the turbine is stopped by closing the runner blades, the vacuum in the inlet remains for hours or even for days, so that the machines can start again quickly at any time. Without inlet vanes or closing guide vanes, a -flow can continue through the incompletely closed runner, which can cause cavitation. For longer periods out of operation, the vacuum is broken.

For an emergency stop and at load rejection, the aeration valve can be opened quickly - for example for the purpose of restricting runaway speed and runaway flow. The aeration valve, normally a tube with a throttle, must be large enough so that the air swept by the turbine does not impede the process. As the turbine keeps turning in air for a long time a brake is recommended. Restart requires time for evacuation. Therefore on sites with frequent load rejections the turbine should be stopped without immediate aerating.

Problems can occur when the head-water level is very unstable. The turbine can start unintentionally because the water level is too high, or they can be aerated and stop because the level is too low. These processes could lead to periodic fluctuations and waves.

The syphon turbine finds its application in the low-head power plants, above all for Kaplan turbines: larger single-regulated vertical groups and small tubular turbines, which can be installed within existing construction, leaving them largely unchanged. The concept is only possible with reaction turbines, it is all the more economic the greater the water flow in relation to the power and head - because big valves and regulating guide vanes are not necessary.