

*Schlussbericht **Dezember 2000***

Wärmenutzung aus dem Rickentunnel

Mehrzweckhalle Kaltbrunn

Cotting René
Cotting Ingenieurbüro AG
Ernetschwilerstrasse 16, 8730 Uznach

Inhaltsverzeichnis

Schlussbericht Dezember 2000	1
1 Zusammenfassung.....	2
2 Ausgangslage.....	6
3 Projektbeschreibung Anlage Rickentunnel.....	6
3.1 Jahresenergiebedarf	7
3.2 Finanzierung	7
3.3 Terminprogramm	7
3.4 Fassung, Zuleitung und Rückführung des Tunnelwassers Wärmetransportleitung.....	7
3.5 Wasserbehandlung und Dosieranlage.....	9
3.6 Wärmenutzung mittels Wärmepumpe.....	10
3.7 Bestimmung und Eigenschaften des Kältemittels	10
4 Erhebung der Kenndaten.....	11
4.1 Messgeräte und Komponenten	11
4.1.1 Wärmepumpe Verdampfernetz (Tunnelwasser):	11
4.1.2 Wärmepumpe Kondensatornetz (Wärmeabgabe).....	11
4.1.3 Temperaturerfassung:.....	12
4.1.4 Erfassung der Laufzeiten- und Einschalthäufigkeiten:.....	12
4.1.6 Elektroenergieerfassung:	12
4.1.7 Erfassung und Registrierung des pH-Wertes:.....	13
4.1.8 Zentraleinheit ZS-60:.....	13
4.1.9 Software "MBUSTOOL":	13
4.1.10 Automatische Registrierung mit "AUTOTOOL":	14
4.1.11 Modem-Fernbetrieb:.....	14
4.1.12 Problematik während der Datenerfassung.....	14
4.2 Ergebnisse	15
4.2.1 Auswertesoftware Fox Pro und Excel.....	15
4.2.2 Jahresarbeitszahlen (JAZ).....	15
6.1.8 Schwankungen der pH-Werte des Tunnelwassers (mit Inhibitoren).....	16
5 Wirtschaftlichkeit	17
6 Betriebserfahrungen	18
7 Literaturverzeichnis	18

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Aktionsprogramms Energie 2000 beauftragte das Bundesamt für Energie im Jahre 1994 eine Gruppe von Ingenieurbüros (Projektleitung Zschokke / Elektrowatt Engineering AG) das Wärmepotential und die Nutzungsmöglichkeiten warmer Tunnelwässer in der Schweiz näher zu untersuchen. Auf Stufe Machbarkeitsstudie konnte bei 5 Tunnels die Realisierbarkeit der Nutzung nachgewiesen werden. Eines dieser ausgewählten Objekte war der Rickentunnel (Fig. 1).

Mit einer Länge von 8603 m gehört der Rickentunnel zur wichtigen Ostschweizer Eisenbahnverbindung St. Gallen - Rapperswil.



Figur 1: Standort der Geothermie- Anlage "Rickentunnel / Kaltbrunn"

Unmittelbar am Rand des Dorfs Kaltbrunn liegt das Südportal des Rickentunnels, aus welchem 690 l/min Bergwasser mit einer Temperatur von 12.3 °C fließt (Fig. 2). Dieses Wasser wird zur Beheizung einer Mehrzweckhalle in Kaltbrunn genutzt (Fig. 3) und soll in einer späteren Phase für Heizzwecke in einer geplanten, grösseren Wohnüberbauung dienen.



Figur 2: Südportal Rickentunnel. In der unteren Bildmitte sichtbar der offene, (U-Profil)-Kanal zur Ableitung des Tunnelwassers

In einer ersten Etappe, d.h. für die Beheizung einer Mehrzweck- und Turnhalle, eines Kindergartens und einer Zivilschutzanlage, wird dem Tunnelwasser mittels Wärmepumpe Wärme entnommen und auf die geforderte Heiztemperatur angehoben.

Damit wird aber erst ein Drittel des Wärmepotentials des Tunnelwassers genutzt. In weiteren Etappen sollen zusätzlich ein Schulhaus und eine geplante, in der Nähe gelegene, Wohnüberbauung mit Heizwärme versorgt werden.



Figur 3: Mehrzweckhalle Kaltbrunn

Der vorliegende Bericht beschreibt das realisierte Projekt und erläutert das begleitende, zweijährige Messkonzept (Erfolgskontrolle) nach Abschluss der Bauarbeiten. Die erhobenen Daten wurden ausgewertet und mit den Annahmen der Machbarkeitsstudie verglichen. Mit den erhaltenen Resultaten konnte die erstellte Anlage energetisch optimiert bzw. Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit gezogen werden. Die Auswertung der beiden Betriebsjahre 1998/99 und 1999/2000 lieferte die folgenden Ergebnisse:

- Unter Berücksichtigung der Hilfsbetriebe lag die Arbeitszahl der Wärmepumpe zwischen 3.01 und 3.54. Die im Sommer erreichten Werte waren wesentlich höher als diejenigen in den Wintermonaten. Die Ursache dafür lag primär in den höheren Wärmequellentemperaturen.
- Der Schwankungsbereich des Nutzungsgrades der gesamten Energieversorgungsanlage über die beiden bisherigen Betriebsjahre liegt zwischen 141 und 288%.
- Bei der Realisierung einer konventionellen Gasheizung wären die spezifischen Wärmegestehungskosten bei rund 15 Rp./kWh konstant geblieben. Bei der schlussendlich realisierten Heizung wurde in der Machbarkeitsstudie von Wärmegestehungskosten von 27 Rp./kWh ausgegangen. Ergeben haben sich Kosten von 34 Rp./kWh im ersten Betriebsjahr bzw. 30 Rp./kWh im zweiten Betriebsjahr. Die höheren Gestehungskosten wurden durch die höheren Investitionskosten sowie durch die geringere als ursprünglich vorgesehene Wärmelieferung (Nutzenergie) verursacht. Für die weitere Zukunft

ist geplant, noch zusätzliche Wärmeabnehmer anzuschliessen. Damit würden sich die Wärmegestehungskosten beträchtlich reduzieren.

- Die Datenauswertung zeigte, dass mit der energetischen Nutzung des Wassers aus dem Rickentunnel beträchtliche Mengen an fossilen Energieträgern und nicht erneuerbaren Energieträgern eingespart werden konnten. Die Einsparung führte zu einer Reduktion der Emissionen resp. Schadstoffe in der Luft und somit zu einer geringeren Umweltbelastung.

In nachstehender Tabelle sind die wichtigsten Energie- und Emissionskenndaten übersichtlich zusammengestellt.

Energie- und Emissionskenndaten			1998 / 1999	1999 / 2000
Energiekenndaten	Produzierte Heizwärme	kWh/a	216'700	249'900
	Antriebsenergie Wärmepumpe	kWh/a	65'900	75'400
	Energiebedarf im Falle der Verwendung von fossilen Brennstoffen	kWh/a	240'700	277'600
	Substitution Gas	m ³ /a	24'070	27'760
	Substitution Öl	l/a	24'070	27'760
	Energieeinsparung	kWh/a	174'800	202'200
Emissionen	CO ₂ Heizöl EL (nach BUWAL)	g/MJ	73.7	73.7
	CO ₂ Erdgas (nach BUWAL)	g/MJ	55.0	55.0
	CO ₂ Heizöl EL (Substitution)	t/a	63.9	73.6
	CO ₂ Erdgas (Substitution)	t/a	47.7	55.0

Mit der Realisierung der Pilot- und Demonstrationsanlage entstanden Mehrkosten gegenüber der Erstellung einer konventionellen Heizung. Diese wurden von folgenden Stellen bzw. Organisationen getragen:

- Bundesamt für Energie: Fr. 105'800.-
 - Kanton St. Gallen: Fr. 105'800.-
 - NOK/SAK: Fr. 120'000.-
- Fr. 331'600.**

Während den Messperioden auftretende Probleme (speziell betreffend erhöhtem Kalkgehalt des Tunnelwassers) wurden laufend behoben. Die Anlage ist heute soweit optimiert, dass sie reibungslos funktioniert. Die Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Lösung sind durch die erhöhte Umweltverträglichkeit vertretbar.

2 Ausgangslage

Im Rahmen des Aktionsprogramms Energie 2000 beauftragte das Bundesamt für Energie im Jahre 1994 eine Gruppe von Ingenieurbüros, unter der Projektleitung Zschokke / Elektrowatt Engineering AG, das Wärmepotential und die Nutzungsmöglichkeiten warmer Tunnelwässer in der Schweiz zu untersuchen.

In einer ersten Phase wurde bis Ende Dezember 1995 von den beauftragten Firmen eine Bestandsaufnahme des energetischen Potentials der Tunnelwässer (Wassermenge und Temperatur) sowie Nutzungsmöglichkeiten bei den Tunnelportalen erarbeitet. Von ca. 700 Eisenbahn- und Strassentunnels wurden 124 bezüglich Realisierungsmöglichkeiten untersucht, wobei 5 davon schlussendlich als Pilotprojekte ausgewählt werden konnten.

Als Auswahlkriterium für die Nutzung des Wärmepotentials wurde definiert, dass die minimale Wassermenge mehr als 600 l/min und die Austrittstemperatur mehr als 10°C betragen sollten. Zusätzlich galt es Aspekte wie Wasserqualität, Abnehmerpotential, Wirtschaftlichkeit sowie das tatsächliche Interesse einer Gemeinde an der Bildung einer Trägerschaft zu berücksichtigen.

Die Anwendung dieser Kriterien ergab zum Abschluss der ersten Beurteilungsphase, dass rund 13 Tunneln echte Realisierungschancen eingeräumt werden konnten.

Die zweite Phase des Projekts begann im Januar 1996 mit weitergehenden Abklärungen über die Nutzungsmöglichkeiten des Bergwassers. Bei diesen Abklärungen ging es darum, die Daten über Wärmeangebot und Abnehmerpotential aus der ersten Phase bei den einzelnen Tunnels nochmals im Detail zu überprüfen. Ebenfalls wurden bereits Gespräche mit betroffenen Stellen geführt um diese von den umweltfreundlichen Vorteilen dieser neuen Art von Energiegewinnung zu überzeugen.

In einem nächsten Schritt wurde dann aufgrund von verschiedenen Entscheidungskriterien, wie Wärme- und Abnehmerpotential, Mehrkosten, Bildung einer Trägerschaft, finanzielle Unterstützung usw., eine Bewertung der erwähnten 13 verbleibenden Tunnels vorgenommen. Gemäss dieser Punktbewertung haben sich die folgenden fünf Tunnel als am erfolgversprechendsten für eine energetische Nutzung herauskristallisiert:

- Anschluss Vispental
- Gotthard inkl. Vortunnel
- Hauenstein Basis
- Mappo-Morettina Nord
- Ricken

In einer dritten Phase wurde schlussendlich für alle fünf, für eine Wärmenutzung in Frage kommenden Tunnel je eine Machbarkeitsstudie inklusive Kostenschätzung erarbeitet.

3 Projektbeschreibung Anlage Rickentunnel

Der Rickentunnel mit einer Länge von 8603 m gehört zur wichtigen Ostschweizer Eisenbahnlinie St. Gallen - Rapperswil. Unmittelbar am Rand des Dorfs Kaltbrunn liegt sein Südportal, aus welchem 690 l/min Bergwasser mit einer Temperatur von 12.3°C fliesst (Fig. 2). Dieses Wasser, das ursprünglich in den Dorfbach entsorgt wurde, wird unter anderem nun zur Beheizung einer Mehrzweckhalle (Fig. 3) verwendet, und soll zukünftig für eine geplante Wohnüberbauung genutzt werden.

3.1 Jahresenergiebedarf

Für die Versorgung der angeschlossenen Liegenschaften wurde von folgendem Jahresenergiebedarf ausgegangen:

- | | | |
|----------------------|-------------|-----------------------------|
| • Mehrzweckhalle: | 158'800 kWh | Energiebezugsfläche=2'963 m |
| • Zivilschutzanlage: | 30'200 kWh | Energiebezugsfläche=1'078 m |
| • Kindergarten: | 63'700 kWh | Energiebezugsfläche= 535m |

3.2 Finanzierung

Aus der Machbarkeitsstudie vom 18. April 1996 ging hervor, dass für die Wärmeversorgung der Mehrzweckhalle im Falle einer Tunnelwasserwärmenutzung mit Aufwendungen von total Fr. 599'000.- gerechnet werden mussten. Im Vergleich zur ursprünglich vorgesehenen Gasheizung ergaben sich nicht amortisierbare Mehrkosten von Fr. 392'000.-.

Die Mehrkosten für die Realisierung der Pilot- und Demonstrationsanlage wurden von folgenden Stellen bzw. Organisationen getragen:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| • Bundesamt für Energie: | Fr.105'800.- |
| • Kanton St. Gallen: | Fr.105'800.- |
| • NOK/SAK: | Fr. 120'000.- |
| | Fr. 331'600. |

Ein verbleibender Restbetrag von nichtamortisierbaren Mehrkosten, im Umfang von Fr. 60'400.-, wurde von der Bauherrschaft übernommen.

3.3 Terminprogramm

Die Bauarbeiten für die Mehrzweckhalle Kaltbrunn hatten bereits im Jahre 1995 begonnen. Aus dem Stand der Arbeiten ergab sich folgendes Terminprogramm:

- | | |
|--|-------------------|
| • Beginn Projektierung Heizungsanlage | ab Mai 1996 |
| • Beginn Bauarbeiten Heizung: | ab Anfang 1997 |
| • Bauende Mehrzweckhalle Kaltbrunn: | Ende Mai 1997 |
| • Messperiode 1: | Betriebsjahr 1998 |
| • Messperiode 2: | Betriebsjahr 1999 |
| • Datenauswertung / Abgabe Schlussbericht: | Ende 2000 |

3.4 Fassung, Zuleitung und Rückführung des Tunnelwassers / Wärmetransportleitung

Von Wattwil nach Kaltbrunn weist der Rickentunnel ein einseitiges Gefälle von 1.5 % auf, und wird vollständig zum Südportal entwässert. Gemäss Angaben der SBB erreichte der Wasserandrang während des Baus des Tunnels (Eröffnung am 1. Oktober 1910) im Mittel Werte von 1'200 und im Maximum von 1'620 l/min.

Tunnelwassermenge und Temperatur haben einen ganz entscheidenden Einfluss darauf, wie viel Wärmeabnehmer mit dieser Wärmequelle versorgt werden können. Es ist deshalb ausserordentlich wichtig, sowohl Wassermenge als auch Temperatur am Tunnelportal genau zu kennen. Eine Schüttung von 1'200 l/min wurde auch im Februar 1965 gemessen, womit sich die mittlere Abflussmenge in 60 Jahren seit dem Bau des Tunnels

nicht verändert hatte. Wasserproben, die im Dezember 1965 an verschiedenen Stellen entnommen wurden, ergaben, dass das anfallende Wasser nicht betonaggressiv ist.

Da die letzten Erhebungen bereits über 30 Jahre zurücklagen, wurden deshalb am 29. März 1996 erneut Messungen durchgeführt. Diese Messungen ergaben, zum Erstaunen aller, deutlich geringere Wassermengen als die von den SBB angegebenen, und erreichten nur Werte von 690 l/min. Ob längere Trockenperioden und Messungenauigkeiten in früheren Jahren oder auch andere Gründe für diese Einbusse verantwortlich waren, konnte nicht mehr festgestellt werden.

In Bezug auf die Wassertemperaturen zeigten die Messungen sowohl am 4. Januar 1996 als auch am 29. März 1996 Werte von 12.3°C. Diese Messwerte entsprachen annähernd den einst von den SBB angegebenen Werten.

Aufgrund dieser Daten konnte von folgendem Kennwerten des zufließenden Wassers aus dem Rickentunnel ausgegangen werden:

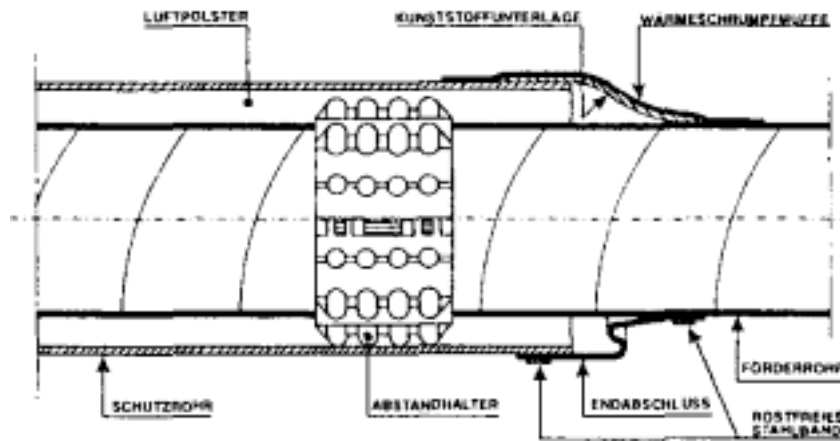
- Tunnelwassermenge: 690 l/min
- Temperatur am Portal: 12.3 °C

Das Tunnelwasser tritt in einer Rigole (Schleuderbetonrohr NW 300 mm) am Portal des Rickentunnels aus. Von dort fließt es in einem U-Profil Kanal etwa 200 m entlang dem Bahngleis (Fig. 2) und traversiert anschliessend den Bahndamm. Messungen hatten gezeigt, dass die Abkühlung des Tunnelwassers im freien Gelände von rund 200 m Länge zwischen Portal und Fassung der Rigole bei einer Aussentemperatur von 2.8°C nur rund 0.2°C beträgt. Eine Kanalabdeckung hätte die Unterhaltsarbeiten erheblich erschwert. Auf eine Abdeckung wurde deshalb verzichtet.

In einem Sammelschacht wird das Tunnelwasser gefasst und in einem Kunststoffrohr zur Mehrzweckhalle geleitet. Als Leitungsdurchmesser wurde ein Rohr NW 150 mm gewählt; als Material fand ein unisoliertes HDPE Doppelrohr Verwendung (Fig. 4). Das äussere Rohr dient als mechanischer Schutz. Im Förderrohr fließt das Tunnelwasser. Das Luftpolster wirkt als Isolator, so dass keine signifikanten Temperaturverluste zwischen Wasserfassung und Verbraucher auftreten können.

Die Rückführung nach erfolgtem Wärmeentzug des bis auf maximal 4 °C abgekühlten Tunnelwassers erfolgt in die bestehende Meteorabwasserleitung. Sofern das Wasser aus dem Rickentunnel nicht im vollen Umfang genutzt werden kann, fließt wie bis anhin, das überschüssige Wasser im Überlauf des Fassungsschachtes in den Dorfbach und anschliessend zurück in den Steinenbach.

Das Tunnelportal liegt auf 483 m.ü.M., die Mehrzweckhalle auf 442 m.ü.M. Aufgrund der geodätischen Höhendifferenz steht ein Druck von etwa 4 bar zur Verfügung. Nach Berücksichtigung der Reibungsverluste bis zur Mehrzweckhalle ist noch ein Betriebsdruck von 3.7 bar vorhanden. Wegen dieser günstigen topographischen Lage der Mehrzweckhalle kann das Tunnelwasser in freiem Gefälle fließen, muss also nicht gepumpt werden. Dies brachte beachtliche finanzielle Vorteile, weil dadurch die Aufwendungen für Pumpenleistungen erspart werden konnten.



Figur 4: Doppelwandiges HDPE- Rohr mit Gleitkufen

3.5 Wasserbehandlung und Dosieranlage

Gemäss Analysen von Wasserproben aus dem Rickentunnel weist das Tunnelwasser einen sehr tiefen Gehalt an freiem CO_2 auf (1.9 mg/l). Im Vergleich zum Gleichgewichts- CO_2 - Gehalt von 11.1 mg/l ist damit ein recht grosses Defizit vorhanden, welches zu Kalkausscheidungen führt.

Verschiedenen Wasserproben haben bestätigt, dass das Kalk- Kohlensäuregleichgewicht des Tunnelwassers zur Alkaliseite hin verschoben ist und damit zu Kalkausscheidungen führt.

Um das Wasser zu stabilisieren, d.h. um Ablagerungen in der Transportleitung und im Verdampfer zu minimieren, wurden als Inhibitoren die folgenden Chemikalien in Betracht gezogen:

- Bindung des Kalkes durch Komplexbildner (z.B. Nitrilo-Tri-Acetat, NTA, oder Polyphosphate)
- Ausgleich des Härtegleichgewichtes durch Zugabe von Säure (z.B. Schwefelsäure, H_2SO_4 , oder Salzsäure, HCl).

Eine Prüfung der verschiedenen Varianten zeigte, dass Phosphate (insbesondere Phosphorsäuren) im Vorfluter problematisch sind und deshalb gemäss Gewässerschutzgesetz nicht in öffentliche Gewässer eingeleitet werden dürfen. Dies hätte zwangsweise die Ableitung des konditionierten Tunnelwassers in eine Kläranlage zur Folge gehabt und wäre damit mit hohen Betriebskosten verbunden gewesen.

Um das Kalk-Kohlensäure-Härtegleichgewicht zu berichtigen wurde zwecks Umweltschutz und Betriebskosten die Variante mit Mineralsäure gewählt. Schwefelsäure ist sehr kostengünstig und in stark verdünnter Form im Vorfluter unproblematisch.

Die entsprechende Dosieranlage wurde in der Heizungszentrale platziert. In der Wasserfassung beim Rickentunnel wird mittels Analogsignale des Durchflusszählers im Verdampfernetz, in Abhängigkeit der Durchflussmenge, Schwefelsäure (30%-wässrig via MDPE- Dosierleitung) zudosiert. Dadurch können Kalkablagerungen in der Wärmetrans-

portleitung und auch im Verdampfer der Wärmepumpe erheblich verringert werden. Die Dosierleitung ist in einem Schutzrohr aus Hart-Polyethylen HDPE K55 verlegt. Zusätzlich wurde ein MDPE Rohr eingelegt. Es kann im Bedarfsfall zur Verwendung eines zusätzlichen Inhibitors verwendet werden.

Bei einer Leckage der Dosierleitung fließt der Inhibitor per Schutzrohr zurück in den Auffangbehälter. Dadurch wird der pH- Sollwert im Kälteübertragungsmedium nicht erreicht (pH-Wert über dem Grenzwert pH- Maximum). Die Dosieranlage und die Wärmepumpe werden ausgeschaltet sowie der Durchfluss des Kälteübertragungsmediums gesperrt. Sofern zuviel Säure zudosiert wird (pH-Wert unter dem Grenzwert pH- Minimum), werden die Dosieranlage und die WP ebenfalls automatisch abgeschaltet.

Die Wasserqualität wird permanent kontrolliert bzw. der pH-Wert mit einem Punktschreiber fortdauernd registriert. Dies gewährt einen hohen Sicherheitsgrad und Kontrolle der öffentlichen Gewässer nach Zufluss des konditionierten Tunnelwassers.

Auf eine zusätzliche Netztrennung im Verdampferkreislauf konnte infolge der geringen Ablagerungen durch die Zudosierung von Inhibitoren verzichtet werden.

3.6 Wärmenutzung mittels Wärmepumpe

Für die erste Etappe, d.h. für die Beheizung der Mehrzweckhalle, wird dem Tunnelwasser mit einer Wärmepumpe Wärme entnommen und auf die geforderte Heiztemperatur gebracht. Die Wärmeerzeugung erfolgt alternierend mit 2 Wärmepumpen mit einer installierten Leistung von je 156 kW. Für den Antrieb der gesamten Wärmepumpen- Heizungsanlagen werden 79'000 kWh an elektrischer Energie benötigt.

Mit der energetischen Nutzung des Wassers aus dem Rickentunnel können beträchtliche Mengen an fossilen Energieträgern eingespart werden. Für die erste Etappe entspricht die Einsparung etwa 28'000 m³ Erdgas (oder 23'700 kg Heizöl) pro Jahr. Die Energieeinsparung ist mit einer Reduktion des CO₂-Ausstosses um 55.7 Tonnen pro Jahr im Vergleich zu Erdgas gekoppelt.

3.7 Bestimmung und Eigenschaften des Kältemittels

Nach umfassenden Abklärungen wurde das Kältemittel Tetrafluorethan R134a (CH₂F-CF₃) eingesetzt. Als grundlegende Entscheidungskriterien war der Ozonabbau- wie auch das Treibhauspotential massgebend. Zudem ist gegenüber dem Kältemittel Difluormonochlormethan R22 (CHF₂Cl) eine höhere Betriebstemperatur möglich. Somit konnten diverse Lüftungsanlagen (Zivilschutzanlage) und der bestehende Kindergarten (Einrohrheizung) mit den erhöhten Betriebstemperaturen versorgt werden. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei 55°C Kondensatoraustrittstemperatur und im Zusammenhang der Umweltverträglichkeit wurde deshalb das Kältemittel Tetrafluorethan R134a eingesetzt.

Das Kältemittel R134a besteht aus teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoff-Verbindungen (H-FKW), ist chlorfrei und weist deshalb kein Ozonabbaupotential (ODP) auf.

Gegenüber den herkömmlichen Kältemitteln mit sehr langen atmosphärischen Verweilzeiten weist das Kältemittel R134a infolge geringer Wasserstoffanteile einen geringen Treibhauspotentialwert (HGWP) von 0.29 gegenüber dem physikalisch vergleichbaren Kältemittel Difluordichlormethan R12 (CF₂Cl₂) von 3,05 auf.

4 Erhebung der Kenndaten

Für die energetische Auswertung der erstellten Anlage werden folgende Kenndaten erfasst:

- Wärmemessungen im Verdampfer- und Kondensatornetz
- Stromverbrauch für die Wärmepumpe samt Kondensatorpumpe
- Stromverbrauch der gesamten Heizungsanlage

Für die Messung des Stromkonsums wurden Doppeltarifzähler eingebaut. Diese werden durch das Netzkommando (Hoch- und Niedertarif) der Elektrizitätsversorgung angesteuert. Die Daten konnten einerseits bei den Rechenwerken der Energiemesseinrichtungen abgelesen werden. Andererseits wurde eine Daten- Zentraleinheit installiert, die vor Ort über eine RS232-Schnittstelle den direkten Datenzugriff auf die gespeicherten Daten ermöglichte. Damit wurde auch die Ablesung der Daten via PC resp. Modem möglich.

Die Energiezählung im Verdampfernetz wird bei "Bypass-Schaltung" (Durchflussmenge $< 1 \text{ m}^3/\text{h}$) unterdrückt. Das Analogsignal des Durchflusszählers (4..20mA) wird für die Dosierung des Inhibitors jedoch weiterhin benötigt.

4.1 Messgeräte und Komponenten

Die Datenerhebung erfolgt mit folgenden Mess- und Steuergeräten:

- Im Verdampfernetz (Tunnelwasser) und im Kondensatornetz (Wärmeabgabe) erfolgt die Wärmemengenummessung mit zwei professionellen Wärmezählern CALEC-MB, welche zusätzlich vier Analogausgänge 4..20 mA für die Vor- und Rücklauftemperatur und die Wärmeleistung enthalten. Der vierte Ausgang steht als Reserve zur Verfügung.
- Die Wärmezähler werden standardmässig mit dem nach EN 1434-3 normierten M-Bus-Datenausgang ausgerüstet. Über den BUS ist eine Vielzahl von Messstelleninformationen auf Abruf verfügbar.

4.1.1 Wärmepumpe Verdampfernetz (Tunnelwasser):

Wärmezähler CALEC MB, mit magnetisch-induktiver Durchflussmessung und Temperaturfühlern (Pt 100):

- Wassermenge maximal: ca. $41 \text{ m}^3/\text{h}$
- Temperaturen: Vorlauf: $8..15^\circ\text{C}$
Rücklauf: $0..10^\circ\text{C}$

4.1.2 Wärmepumpe Kondensatornetz (Wärmeabgabe)

Wärmezähler CALEC-MB, mit magnetisch-induktiver Durchflussmessung und Temperaturfühlern (Pt 100):

- Wassermenge maximal: ca. $16 \text{ m}^3/\text{h}$
- Temperaturen: Vorlauf: 55°C
Rücklauf: 15°C

4.1.3 Temperaturerfassung:

Der CALEC-MB Messumformer erfasst mit einem Temperaturfühler Pt 100 die Aussen-temperatur und zeigt diese am Display an. Die Werte werden zusätzlich am M-Bus wiedergegeben. Der Anschluss erfolgt am Kaltseiteneingang und die Temperatur wird auch als solche weitergereicht.

Der zweite Temperaturmesseingang am CALEC-MB Messumformer wird für die Erfassung der Kondensator-Eintrittstemperatur verwendet und zeigt diese am Display an. Die Werte werden zusätzlich am M-BUS wiedergegeben. Der Temperaturmessteil des CALEC-MB wird in diesem Fall als Temperaturtransmitter verwendet, welcher jeweils die genauen aktuellen Temperaturwerte im Abfragezeitpunkt wiedergibt.

Das Temperatursignal des Aussenfühlers wird zudem als Gleichstromsignal von 4..20 mA des Analogausganges herausgegeben, programmierter Bereich 4..20 mA = -30..+40°C.

4.1.4 Erfassung der Laufzeiten- und Einschalthäufigkeiten:

Einrichtung zur Erfassung der Einschaltdauer von Verdichter 1, Verdichter 2, Verdichter 1+2 und der Kondensatornetzpumpe:

- Mittels eines quarzgeführten Taktgebers werden Zeitimpulse von 6 sec. Periodendauer erzeugt. Diese werden über Kontaktschaltungen mit dem jeweiligen Impulssammler (AMBUS- IS) verbunden. Diese wiederum summieren die Zeitimpulse der entsprechenden Zustände und stellen sie am M-BUS in Form eines Laufzeittotals zur Verfügung. Die Laufzeitangabe ergibt 600 Zählpunkte pro Stunde. Daraus resultiert eine Betriebszeit von 16'666 h vor einem Zählerüberlauf.

Einrichtungen zur Erfassung der Anzahl Einschaltungen von Verdichter 1, Verdichter 2, Verdichter 1+2 und der Kondensatornetzpumpe:

- Jede Einschaltung von Verdichter 1, Verdichter 2, Verdichter 1+2 und Kondensatornetzpumpe wird in Form eines Dauerimpulses in je einem Impulssammler addiert. Das Impulstotal des jeweiligen Impulssammlers stellt die Summe aller Einschaltungen dar und wird über den M-BUS abgerufen werden. Jeder Zählpunkt entspricht einer Einschaltung. Die Zählerkapazität beträgt 9'999'999 Schaltungen.

4.1.6 Elektroenergieerfassung:

Wärmepumpe

Einrichtung zur Umwandlung der Impulssignale des Wärmepumpen-Elektrozählers in einen Leistung Momentanwert und Kumulation des Verbrauchswertes mit M-BUS-Anschaltung.

Die Energieerfassung erfolgt mit einem Elektrozähler, welcher einen energieproportionalen Impuls von 6'000 Imp/kWh an einer SO-Schnittstelle abgibt. Durch den benutzten Stromwandler ergibt sich ein Ables Multiplikationsfaktor 40. Daraus resultiert ein Impulswert von 6.6667 Wh.

Berechnung: Impulswert $1/6'000 \times 40 = 0.006667 \text{ kWh} = 6.6667 \text{ Wh}$ resp. 20.0 für 3 Phasen.

Das Signal wird vom Volumeneingang eines CALEC-MB verwertet und in einen entsprechenden Volumenstrom umgewertet, welcher als Analogsignal von 4.. 20 mA als Momentanleistung ausgegeben wird. Messbereich 0..100 kW. Die Energieanzeige des CALEC-MB ist nicht verwendbar, da die Temperaturwerte anderweitig benützt werden. Diese Information wird als Durchflussmomentanwert (für die Leistung in kW) und als Durchflusstotal in m^3 (für das Energietotal in kWh) auf dem M-BUS übertragen.

Heizungsanlage

Die mit 6.6667 Wh gewichteten Impulse des Heizungselektrozählers (Berechnung siehe oben) werden in einem Impulssammler addiert und stehen als Verbrauchstotalwert und als Leistungswert am M-Bus zur Verfügung.

4.1.7 Erfassung und Registrierung des pH-Wertes:

Der pH-Wert des Tunnelwassers wird gemessen und in ein Messsignal von 0..20 mA gewandelt (pH- Messbereich 2..12= 0..20 mA). Das Signal wird von einem M-Buswandler verarbeitet und in 0..4'000 digitale Messpunkte umgewandelt. Dies ergibt einen Bewertungsfaktor des Digitalwertes von 200 pro mA. Der ENDYS- M- Buswandler benötigt eine Speisespannung von $24 \text{ VDC} \pm 10\%$, $> 25 \text{ mA}$, welche von einem separaten Netzgerät bezogen wird. Die Umrechnung des Messsignals erfolgt nach der Formel:

- $\text{pH-Wert} = (\text{Anzahl Messpunkte} / 400) + 2$

Die Erhebung wurde am Ende der zweiten Messperiode aus Sicherheitsgründen und im Sinne der Störfallvorsorge weitergeführt. Das Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen verfügte im Rahmen der für das Bauvorhaben erforderlichen Bewilligungen die Registrierung des pH-Werts des konditionierten Tunnelwassers während der vollständigen Betriebsphase der Anlage.

4.1.8 Zentraleinheit ZS-60:

Die Datenerfassung erfolgt mittels eines M-BUS-Systems an einem zentralen Speise- und Auslesepunkt (ZS-60) mit Datenschnittstelle RS-232. Sie dient zur Speisung der angeschlossenen Impulssammler und zur Pegelwandlung von M-BUS auf RS-232. Die Zentraleinheit ist transparent und hat keine eigene Intelligenz (Programm, Speicher etc.). Die gesamte Messeinrichtung befindet sich im Elektro-Schaltkasten und weist somit nur sehr kurze Busverbindungen auf. Die Verbindung zum aussenliegenden PC erfolgt mit ca. 5 m RS-232-Kabel an einen externen Steckanschlusspunkt.

4.1.9 Software "MBUSTOOL":

Die "MBUSTOOL"- Software dient der Parametrierung, Auslesung und Protokollierung aller via M-BUS verfügbaren Daten. Das Programm ist gleichzeitig in der Lage, selbsttätig periodische Abfragen auszuführen und das Ergebnis in einer Datei anzufügen. Das Programm läuft auf PC unter DOS und benötigt eine COM- Schnittstelle sowie eine Maus. Bei neueren PCs ist auch ein Betrieb unter Windows (V3.1 od. V95) in einem DOS-Fenster möglich. Durch den Betrieb des artfremden Analogkonverters wird eine modifizierte MBUSTOOL- Software benötigt, welche auch dessen Besonderheiten erfasst.

4.1.10 Automatische Registrierung mit "AUTOTOOL":

Die MBUSTOOL- Software kann mit einer Batchdatei gestartet werden, welche die periodische Auslesung und Registrierung aller Zähler und die Aufzeichnung der Werte in einem kontinuierlichen Modus erlaubt. Die Aufzeichnung der 14 vorhandenen mit 2'400 Baud dauert 56 Sekunden. Im Prinzip ist es möglich, die Daten jede Minute zu protokollieren. Dies bedingt dass der PC mit einem Multitasking Betriebssystem wie Windows 95/98 oder NT betrieben wird. Im gewählten Ablesezyklus von 5 Minuten erfolgt die Datenabfrage aller 14 Messstellen und wird auf dem PC gespeichert. Um 24.00 h erfolgt die Generierung eines ASCII- Tages Files in der Grösse von rund 844 kB.

4.1.11 Modem-Fernbetrieb:

Es kann zwischen einem direkten und indirekten Fernbetrieb unterschieden werden:

Der direkte Fernbetrieb besteht aus einem M-BUS-Betrieb über Modem, d.h. an der AMBUS-ZS wird an Stelle eines Computers ein Modem angeschlossen, welches in der Lage ist, das M-BUS-Protokoll direkt und unverzerrt über die Fernmeldeleitung (TT etc.) zum Empfangs- PC zu übertragen. Für diese Lösung ist ein Modem erforderlich, welches den dynamischen Anforderungen gewachsen ist. Für diese Anlage war dies nicht die geeignete Lösung, da die Telefonleitung durch die häufige Abfrage fast dauernd belegt worden wäre. Deshalb wurde für die Datenerfassung der indirekte Fernbetrieb gewählt.

Der indirekte Fernbetrieb besteht aus einem örtlichen PC, welcher direkt mit der AMBUS-ZS verbunden ist. Der Fernbetrieb des PCs ist mit Software-Programmen wie zum Beispiel PC- Anywhere oder Laplink möglich. Diese Nutzungsart verhindert jedoch die gleichzeitige Datenerfassung während des Fernbetriebes. Für die Kommunikation von PC zu PC wurde deshalb das Remote- Access-Server-Tool unter Windows gewählt. Damit kann mit einem Modem oder ISDN-Terminal-Adapter über das Telefonnetz eine Netzwerkverbindung zwischen dem Büro-Computer und dem auf der Anlage platzierten Computer aufgebaut werden. Man bezeichnet eine solche Verbindung als DFU-Netzwerk. Nach dem Aufbau der Verbindung können alle freigegebenen Ressourcen auf dem Computer-Netzwerk, wie etwa Dateien oder Drucker, verwendet werden. Damit ist auch gewährleistet, dass mit der "AUTOTOOL"- Software und einem Multitasking-Betriebssystem (W oder WIN-NT) die Aufzeichnung der Betriebsdaten ohne Unterbruch erfolgt. Die Modems können von Analog bis ISDN beliebig gewählt werden.

4.1.12 Problematik während der Datenerfassung

Anfänglich war die Datenabfrage sehr unzuverlässig, weil diverse Geräte in unmittelbarer Nähe von Starkstromleitungen platziert waren. Dies führte dann dazu, dass nur abgeschirmte Anschluss- und Verbindungskabel für die Messeinrichtungen und Busverbindungen verwendet werden durften.

Weiter wurde festgestellt, dass während der Generierung des Tagesfiles keine Datenablesung erfolgen durfte, ansonst die "AUTOTOOL"- Software neu gestartet werden musste. Durch die Ungenauigkeit der PC- Uhren kann dies jedoch nicht verhindert werden.

Ebenfalls ist bekannt, dass es unter WIN95/98 spätestens nach rund 49 Tagen unterbruchsfreiem PC-Betrieb zu einem "PC-Absturz" kommt. Deshalb ist es zwingend notwendig, den PC allmonatlich neu zu starten.

Die Unachtsamkeit Dritter hatte anfänglich zu diversen Abschaltungen des vor Ort platzierten PCs oder der USV geführt. Deshalb fehlen für die energetische Analyse im Betriebsjahr 1998 einzelne Tageswerte.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Auswertesoftware Fox Pro und Excel

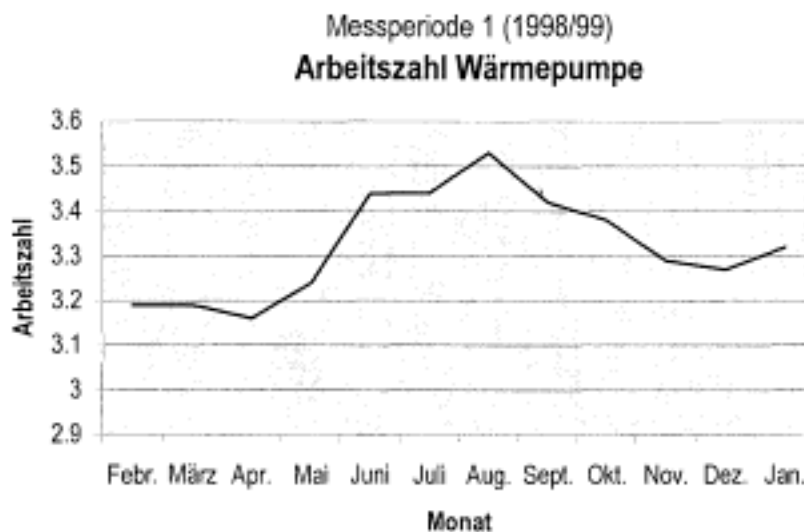
Für die Auswertung der erhobenen Messdaten wurden die folgenden gängigen Softwareprodukte verwendet:

- Microsoft Fox Pro
- Microsoft Excel

4.2.2 Jahresarbeitszahlen (JAZ)

In der ersten Messperiode wurde eine mittlere Arbeitszahl der Wärmepumpe plus Hilfsbetriebe von 3.27 erreicht. Er liegt damit über den Erwartungen der Machbarkeitsstudie (Vergleichswert = 3.2).

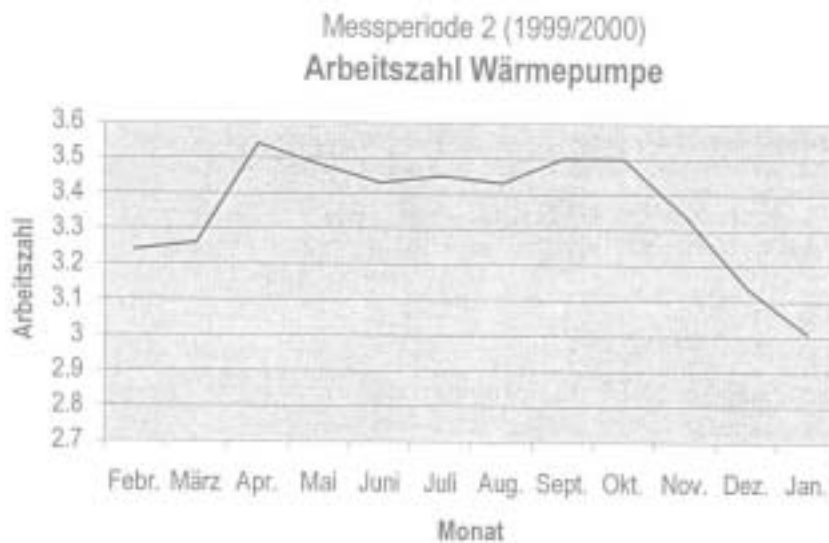
Aus Figur 5 ist der Verlauf der Arbeitszahl der Wärmepumpe plus Hilfsbetriebe über die gesamte Messperiode ersichtlich. Der Schwankungsbereich liegt zwischen 3.19 und 3.53.



Figur 5: *Arbeitszahl Wärmepumpe plus Hilfsbetriebe (1998 / 99)*

In der zweiten Messperiode wurde eine mittlere Arbeitszahl der Wärmepumpe von 3.26 erreicht. Er liegt damit ebenfalls über der Erwartung der Machbarkeitsstudie (vergleichswert= 3.2)

Aus Figur 6 ist der Verlauf der Arbeitszahl der Wärmepumpe über die gesamte Messperiode ersichtlich. Der Schwankungsbereich liegt zwischen 3.01 und 3.54.



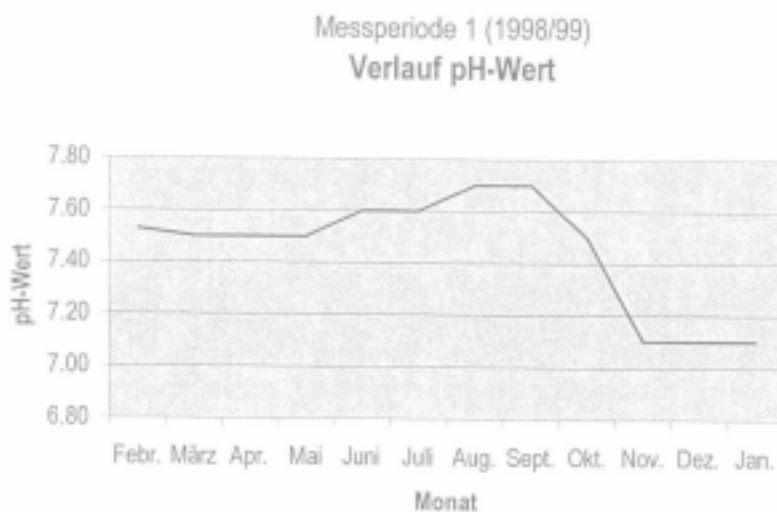
Figur 6: Arbeitszahl Wärmepumpe plus Hilfsbetriebe (1999 / 2000)

Die mittleren Arbeitszahlen der Wärmepumpe bewegen sich im Bereich von 3.26 - 3.27. Höhere Arbeitszahlen können bei einer gleichartigen Anlage-Realisierung (d.h. gleichzeitige Brauchwarmwasser Erzeugung von 60 °C, Koppelung mit Lüftungsanlage) aus physikalischen Gründen nicht erzielt werden.

6.1.8 Schwankungen der pH-Werte des Tunnelwassers (mit Inhibitoren)

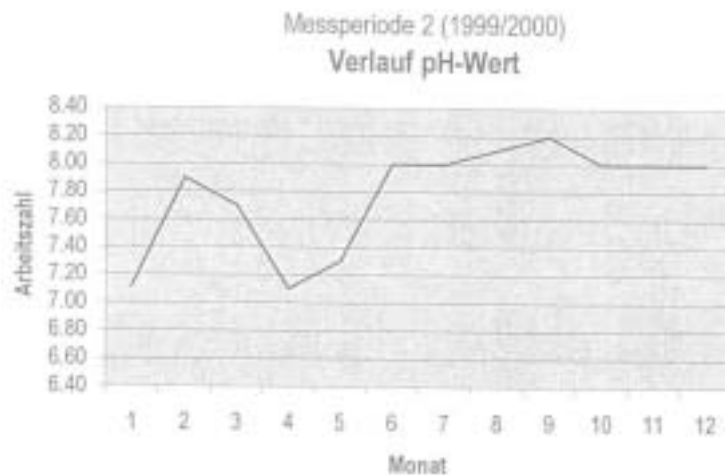
Die Konditionierung des Tunnelwassers hat entsprechend den Vorgaben funktioniert. Die Anlage gewährleistet jederzeit die Sicherheit der Gewässer vollumfänglich.

Figur 7 zeigt den Verlauf des pH-Werts über die Messperiode 1998/99. Durch die erhöhte Zudosierung von 30%-wässriger Schwefelsäure konnte der pH-Wert optimiert und stabilisiert werden. Eine Minimierung der Verkalkung der Zuleitungen zur Wärmepumpe und der übrigen Bestandteile des Verdampfernetzes blieb damit gesichert.



Figur 7: Verlauf der pH Messwerte (1998 / 99)

Figur 8 zeigt den Verlauf des pH-Werts über die Messperiode 1999 / 2000). Durch Verunreinigung der Messsonde unterlag der pH-Wert im Vergleich zum ersten Betriebsjahr einer leicht erhöhten Schwankung. Der pH-Wert wurde deshalb zusätzlich mittels Handmessungen überprüft. Diese Handmessungen ergaben tendenziell tiefere pH-Werte.



Figur 8: Verlauf der pH Messwerte (1999 / 2000)

5 Wirtschaftlichkeit

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der erstellten Wärmeerzeugungsanlage sind nicht nur die Investitionen, sondern auch die Jahreskosten, d.h. die jährlich anfallenden Aufwendungen für Kapaldienst, Betrieb, Wartung und Unterhalt von Bedeutung. Die Auswertung der Messdaten beruht auf dem vom Bundesamt für Energie vorgegebenen Konzept. Die einzelnen Kostenpositionen lassen sich dabei wie folgt gliedern:

- Kapaldienst: Wärmegewinnung, Wärmeerzeugung, Wärmeversorgung, Bau
- Betriebskosten: Wärmepumpe (Energie), Wärmepumpe (Leistung), Heizkessel (Energie), Heizkessel (Grundpreis), Internpumpen, Wärmeversorgungspumpen, Wasserzins
- Unterhalt und Wartung: Wärmeerzeugung (Kaminfeger, Säure, Messstreifenpapier, Gebühren Wasserrecht)
- Vergleichswerte konventionelle Anlage (Gasfeuerung)
- Baunebenkosten: Ingenieur- und Architektenhonorar
- Jahreskosten: ganze Geothermieranlagen, Wärmelieferung
- Wärmegestehungskosten

Der Kostenvergleich erfolgt gemäss der Anleitung in der Machbarkeitsstudie für die Wärmenutzung aus dem Rickentunnel.

Die Kosten für die realisierte Heizung (Wärmeerzeugung durch geothermische Nutzung des Tunnelwassers) fielen um rund Fr. 10'000.- höher aus als in der Machbarkeitsstudie angenommen. Die Gründe für die Mehrkosten liegen in erschwerten Baubedingungen. Die Baunebenkosten hingegen konnten geringfügig tiefer gehalten werden.

Die Energiegestehungskosten betrugen im ersten Betriebsjahr der Anlage 34 Rp./kWh. Nach Abzug sämtlicher öffentlicher Unterstützungsbeiträge resultiert ein Energiegeste-

hungspreis von 21 Rp./kWh. Unter Berücksichtigung sämtlicher Vorinvestitionen für eine zukünftige Erweiterung der Anlage (Kosten für die Wärmetransportleitung) betragen die Energiegestehungskosten noch 17 Rp./kWh.

Der Energiegestehungspreis beträgt bei einer konventionellen Anlage 15 Rp./kWh, unter Beachtung externer Kosten für Umweltschädigungen 20 Rp./kWh.

Die Energiegestehungskosten betrugen im zweiten Betriebsjahr der Anlage 30 Rp./kWh. Nach Abzug sämtlicher öffentlicher Unterstützungsbeiträge resultiert ein Energiegestehungspreis von 19 Rp./kWh. Unter Berücksichtigung sämtlicher Vorinvestitionen für eine zukünftige Erweiterung der Anlage (Kosten für die Wärmetransportleitung) würden sich die Energiegestehungskosten auf 15 Rp./kWh reduzieren.

Aus dem Vergleich der Betriebsjahre 1998/99 und 1999/2000 resultiert, dass bei erhöhten Betriebszeiten die Energiegestehungskosten der realisierten Anlage sinken. Bei einer Senkung der externen Energiekosten (tiefere Strompreise infolge Strommarktsliberalisierung) werden sich die Energiegestehungskosten der realisierten Anlage ebenfalls zusätzlich verringern.

6 Betriebserfahrungen

Die Datenauswertung zeigt, dass mit der energetischen Nutzung des Wassers aus dem Rickentunnel beträchtliche Mengen an fossilen Energieträgern, also nicht erneuerbaren Energieträgern, eingespart werden konnten. Die Einsparung führt zu einer Reduktion der Emissionen resp. Von Schadstoffen in der Luft und somit zu einer geringeren Umweltbelastung.

Schadstoffreduktion:

- **CO₂:** ca. 55 t/a
- **NO_x:** ca. 12 kg/a

Während den Messperioden aufgetretene Probleme wurden laufend behoben. Die Anlage ist heute soweit optimiert, dass sie weitgehend reibungslos funktioniert. Die Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Lösung sind durch die erhöhte Umweltverträglichkeit vertretbar.

Mittels geeigneter Inhibitoren konnten Kalkablagerungen sowohl in den Zuleitungen als auch in der Heizanlage verhindert werden, wobei dem Gewässerschutz jederzeit vollumfänglich genüge getan werden kann. In diesem Sinne existieren keine ungelösten Probleme mehr.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ARGE Zschokke AG Dietlikon / Elektrowatt Engineering AG Zürich:
"Gewinnung geothermischer Energie aus Tunnels - Bericht Phase 1: Bestandesaufnahme Wärmepotential, Identifizierung möglicher Verbraucher" (Kurzfassung Schlussbericht), Dezember 1995
- [2] ARGE Zschokke AG Dietlikon / Elektrowatt Engineering AG Zürich:
"Gewinnung geothermischer Energie aus Tunnels - Bericht Phase 2" (Kurzfassung Schlussbericht), Dezember 1996

- [3] Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG / Coting Ingenieurbüro AG:
"Machbarkeitsstudie mit Kostenschätzung für Wärmenutzung aus dem Rickentunnel", 18. April 1996
- [4] Recknagel / Sprenger / Schramek: *"Taschenbuch für Heizung + Klima + Technik"*, Oldenburg 1998/99