

24825
65120

Programm
Geothermie

Energetische Nutzung der Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen

ausgearbeitet durch
M. Keller und T. Mégel
Electrowatt Engineering AG, Zürich
Bellerivestrasse 36
8034 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Mai 1998

Schlussbericht

Ausschnitt Stadtplan Zürich 1:5'000

Thermalbohrung Tiefenbrunnen

Schlussbericht

Machbarkeitsstudie mit Kostenschätzung für Wärmenutzung

Mai 1998

1. Zusammenfassung und Empfehlung

1.1. Projektbeschreibung

Aus der Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen werden heute 5.8 lit./s 26 grädiges Wasser gefördert und damit zwei Duschen und das Planschbecken des Strandbades Tiefenbrunnen sowie ein Kugelbrunnen gespiesen. Diese wünschbare aber nicht notwendige Nutzung der Thermalquelle im Seefeld kostet die Stadt Zürich jährlich rund 40'000 Fr. Zur Zeit wird im Auftrag der Industriellen Betriebe der Stadt Zürich sowie des Bundesamtes für Energie abgeklärt, ob das Thermalwasser nicht sinnvoller zu Heizzwecken von Liegenschaften in der Nähe der Bohrung genutzt werden könnte.

1.2. Wärmegewinnung

Gemäss Projektvorschlag wird das Thermalwasser in einer unisolierten, doppelwandigen Kunststoffleitung als kalte Fernwärme zu den Verbrauchern transportiert. Nach dessen Nutzung wird es im gleichen Graben wieder zur Fassung zurück geführt und über die bereits bestehende Transportleitung via Ententeich in den Zürichsee entsorgt.

1.3. Wärmenutzung

Bedingt durch das Temperaturniveau ist die Nutzung des Thermalwassers nur mittels einer Wärmepumpe möglich. Es wird deshalb vorgeschlagen, bei den potentiellen Verbrauchern eine dezentrale Elektrowärmepumpe zu installieren, die bei tiefen Aussentemperaturen durch einen Spitzenkessel ergänzt wird. Denkbar ist auch eine zentrale Lösung, wo das Wasser in einer einzigen Heizzentrale erwärmt und dann als heisse Fernwärme an die einzelnen Verbraucher verteilt wird. Diese Variante wurde im Rahmen dieser Studie aber nicht untersucht. Als interessantester Verbraucher steht dank der kurzen Distanz zur Fassung das Casino Zürichhorn zur Diskussion. Weitere mögliche Wärmeabnehmer sind die ebenfalls der Stadt gehörende Alterssiedlung Riesbach sowie private Liegenschaften an der Baurstrasse. Bei Anschluss sämtlicher dieser Verbraucher weist der Brunnen noch eine gewisse Reserve auf.

1.4. Kosten und Wirtschaftlichkeit

Die Kosten der Thermalwassernutzung sind ungefähr proportional zum Ausbaugrad. Bei Anschluss nur des Casinos liegen die erforderlichen Investitionen bei Fr. 341'000 und im Vollausbau (Casino, Alterssiedlung und Baurstrasse) bei Fr. 1.23 Mio. Betriebswirtschaftlich, d.h. mit heutigen Energiepreisen gerechnet, ergeben sich Wärmegestehungskosten für die Thermalwassernutzung von 9.8 Rp./kWh. Mit Berücksichtigung möglicher Subventionen reduziert sich dieser Wert auf 7.8 Rp./kWh. Im Vergleich dazu betragen die Wärmegestehungskosten einer konventionellen Ölheizung 5.6 Rp./kWh.

1.5. Umweltaspekte

Mit der energetischen Nutzung des Thermalwassers aus der Bohrung Tiefenbrunnen können beträchtliche Mengen an fossilen Energieträgern eingespart werden. Für die erste Etappe entspricht die Einsparung etwa 56 to und im Endausbau 194 to Heizöl pro Jahr. Dieser Umweltbonus kann durch den Einbezug von externen Kosten in der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt werden. Falls dies gemacht wird, so ergeben sich sowohl für die Thermalwassernutzung als auch für die Ölheizung Wärmegestehungskosten von etwa 11.5 - 12.0 Rp./kWh.

1.6. Empfehlung

Eine Thermalwassernutzung aus der Bohrung Tiefenbrunnen ist technisch ohne besondere Probleme machbar, ist ökologisch sinnvoll und liegt auch von den Kosten her im Rahmen anderer alternativer Heizsysteme. **Der Bau dieser Anlage wird deshalb mit Nachdruck empfohlen.**

Rein betriebswirtschaftlich gerechnet ist bei den heutigen tiefen Ölpreisen die Konkurrenzfähigkeit der Thermalwassernutzung zu einer konventionellen Ölfeuerung noch nicht gegeben. Unter Einbezug der externen Kosten sind beide Varianten jedoch durchaus miteinander vergleichbar.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnungen zeigen, dass die Wärmegestehungskosten für alle Ausbautappen etwa gleich hoch sind. Detaillierte Angaben dazu finden sich in Tabelle 6.4. Um die Kapazität des Brunnens möglichst gut auszuschöpfen, wäre es deshalb interessant, alle Verbraucher (Casino, Alterssiedlung und Baurstrasse) mit Thermalwasser zu versorgen. Aus folgenden 2 Gründen wird jedoch empfohlen, auf diese Maximalvariante zu verzichten.

- Das Casino Zürichhorn und auch die Alterssiedlung Riesbach gehören beide der Stadt Zürich, während die Liegenschaften an der Baurstrasse privat sind. Aus Erfahrung ist bekannt, dass Private im allgemeinen nicht bereit sind, höhere Kosten in Kauf zu nehmen. Die Stadt Zürich hat sich dagegen in den Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsrechnung bei energetischen Massnahmen verpflichtet, primär die externen Kosten als Entscheidungsgrundlage für die Erstellung der Rangfolge zu verwenden.
- Aus Altersgründen und wegen der Luftreinhalteverordnung ist eine Erneuerung der Heizung nur im Casino Zürichhorn zwingend. Bei den anderen Liegenschaften ist dagegen noch kein dringender Sanierungsbedarf vorhanden. Es besteht deshalb als Minimalvariante mit den geringsten Investitionen auch die Möglichkeit, nur das Casino mit Thermalwasser zu versorgen. Falls es die Finanzlage der Stadt allerdings erlaubt, wird empfohlen, beide städtische Gebäude umweltfreundlich zu beheizen.

1.7. Summary

Electrowatt Engineering Ltd. has been commissioned by the Federal Office of Energy and the department for industrial Services of the city of Zürich to carry out a feasibility study on the use of thermal water from an existing 736 m deep borehole in Zürich Switzerland to supply heat for buildings. Today the 26 °C warm water is used in summer time for two showers and for heating purposes of a small swimming pool for children. The capacity of the aquifer amounts to 8 lit./s which means that in the maximum 670 kW could be extracted from the water as heat source for an electrically driven heat pump. The study showed that one to three larger buildings in the neighborhood of the heat source exist that could easily be supplied by that energy by means of a small district heating system. The overall cost of energy for such an environmentally friendly solution is in the order of 9.8 Rp./kWh. In contrast to that the respective cost of an oil fired heating system amount to about 5.6 Rp./kWh. From an economic point of view the use of thermal water is not yet competitive for energy prices of today. However by taking external costs into account, both systems become comparable (11.5 - 12.0 Rp./kWh).

1.7. Zusammenfassung der wichtigsten Projektdaten

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Wärmeabnehmer				
- Art der Verbraucher		Casino	Casino Alterssiedl.	Casino Alterssiedl. Baurstr.
- Anzahl Gebäude	Stk.	1	2	3
- Wärmeleistungsbedarf	kW	300	700	1030
- Nutzenergiebedarf	MWh/a	620	1470	2150
Wärmegewinnung				
- genutzte Thermalwassermenge	l/sec.	1.7	4.0	5.9
- Wassertemperatur am Bohrkopf	°C	26	26	26
- Wassertemperatur bei Verbraucher	°C	24	24	24
- Rückgabetemperatur	°C	9	9	9
- Entzugsleistung	kW	100	233	343
- Leitungslänge einfach (nur Vorlauf)	m	80	400	480
- Nennweite Innenrohr	DN	75	75	90
Wärmeerzeugung				
- Heizleistung Wärmepumpe	kW	150	350	515
- Arbeitszahl Wärmepumpe (ohne Pumpe)		3.5	3.5	3.5
- Heizleistung Spitzenkessel	kW	150	350	515
Kosten und Wirtschaftlichkeit				
- Investitionen für Thermalwassernutzung	Fr.	341'630	812'419	1'232'535
- Kosten Thermalwasser ohne Subvention	Fr./a	60'500	140'983	214'412
- Kosten Thermalwasser mit Subvention	Fr./a	48'176	109'899	168'686
Wärmegestehungskosten Thermalwasser				
- betriebswirtschaftlich ohne Subventionen	Rp./kWh	9.8	9.6	10.0
- betriebswirtschaftlich mit Subventionen	Rp./kWh	7.8	7.5	7.8
- mit externen Kosten	Rp./kWh	11.9	11.8	12.2
Wärmegestehungskosten Ölheizung				
- betriebswirtschaftlich	Rp./kWh	5.6	5.3	5.6
- mit externen Kosten	Rp./kWh	11.5	11.3	11.5
Nicht amortisierbare Mehrkosten	Fr.	352'000	888'000	1'306'000
Subventionen				
- Anteil BFE (25 %)	Fr.	88'000	222'000	327'000
- Anteil Stromsparfonds (25 %)	Fr.	88'000	222'000	327'000
Abklärungen bezüglich Realisierung				
- Trägerschaft		EWZ	EWZ	EWZ
- möglicher Terminplan		1999	1999	
Umweltaspekte				
- Oeleinsparung	kg/a	55983	133504	194957
- Reduktion NOx-Emissionen	kg/a	51	122	178
- Reduktion CO2-Emissionen	t/a	131	312	456

Tabelle 1.1: Zusammenfassung der wichtigsten Projektdaten

2. Inhaltsverzeichnis

2.1. Inhalt

1. Zusammenfassung und Empfehlung	1
1.1. Projektbeschreibung	1
1.2. Wärmegewinnung	1
1.3. Wärmenutzung	1
1.4. Kosten und Wirtschaftlichkeit	1
1.5. Umweltaspekte	1
1.6. Empfehlung.....	2
1.7. Summary	2
1.7. Zusammenfassung der wichtigsten Projektdaten	3
2. Inhaltsverzeichnis	4
2.1. Inhalt	
2.2. Anhänge	5
3. Wärmeabnehmer	6
3.1. Versorgte Gebiete.....	6
3.2. Ausbaupläne.....	8
3.3. Wärmeleistungs- und Energiebedarf	8
3.4. Vorhandene leitungsgebundene Energieträger	8
4. Wärmegewinnung	9
4.1. Wärmequelle.....	9
4.2 Abschätzung der langfristigen geothermischen Leistung	10
4.2.1 Gewährleistung der Förderrate.....	11
4.2.1.1 Hydraulischer Zustand der OMM am Standort Tiefenbrunnen	11
4.2.1.2. Einfluss der Nutzung auf die Hydraulik.....	12
4.2.1.3 Ergiebigkeitsreserven	15
4.2.2 Gewährleistung der Wassertemperatur	17
4.3.Fassung des Thermalwassers.....	19
4.4 Entsorgung des Thermalwassers	20
4.41 Einleitung in Hornbach.....	20
4.42 Einleitung in Kanalisation	21
4.43 Einleitung in Zürichsee	21
4.5. Leitungsführung	23
4.6.Dimensionierung der Transportleitung.....	25
5. Wärmeerzeugung	29
5.1. Technisches Konzept	29
5.11 Casino Zürichhorn	30
5.12 Alterssiedlung Riesbach	31
5.2 Optimierung der Wärmepumpenanlage.....	32
5.21 Fördermenge resp. Abkühlung des Thermalwassers	32
5.22 Kondensationstemperatur der Wärmepumpe.....	33
5.23 Regelung der Förderpumpe.....	33
5.3.Auslegung.....	36

6. Kosten und Wirtschaftlichkeit	40
6.1. Investitionen.....	40
6.11 Variante 1: Einrohrsystem	40
6.12 Variante 2: 2-Rohrsystem	41
6.2. Annahmen für Wirtschaftlichkeitsrechnung	42
6.3. Kosten der Thermalwassernutzung	43
6.31 betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsrechnung	43
6.32 erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung mit externen Kosten	46
6.4. Vergleich mit konventioneller Anlage.....	47
6.4.1. Investitionen.....	47
6.42. Kosten einer Ölheizung	49
6.421 betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsrechnung	49
6.422 erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung mit externen Kosten	50
7. Abklärungen bezüglich Realisierung	52
7.1. Bisherige Kontakte und Verhandlungen	52
7.2. Trägerschaften und mögliche Organisationsformen.....	52
7.3. Möglicher Zeitplan für Realisierung	52
8. Umweltaspekte	54
Anhang 55	

2.2. Anhänge

A1	Leitungerhebungen
A2	Querschnitte Unterquerung Bellerivestrasse und Hornbach
A3	Wasseranalyse des Thermalwassers Tiefenbrunnen
A4	Konzession für Nutzung des Thermalwassers
A5	Unterlagen Casino Zürichhorn
A6	Unterlagen Alterssiedlung
A7	Literaturverzeichnis

3. Wärmeabnehmer

3.1. Versorgte Gebiete

Aus der Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen werden heute im Jahresdurchschnitt kontinuierlich 5.8 lit./s 26 Grad warmes Wasser gefördert und damit im Sommer das Kinderplanschbecken und zwei Duschen des Strandbades Tiefenbrunnen versorgt. Zusätzlich wird während des ganzen Jahres ein Kugelbrunnen mit Thermalwasser gespeist und das Wasser von dort in einen Ententeich entsorgt. Die Enten und anderen Wasservögel scheinen das warme Thermalwasser im Teich vor der „Fischerstube“ zu geniessen und auch die Besucher des Kugelbrunnen sind offensichtlich fasziniert, wie sich eine so grosse Steinkugel anscheinend schwerelos im ausgesparten Brunnenbecken durch die Wasserkraft drehen lässt. Diese wünschbare aber nicht notwendige Nutzung der Thermalquelle im Seefeld kostet die Stadt Zürich jährlich rund 40'000 Fr. für den Betrieb der Förderpumpen.

Wegen der schwierigen Finanzlage der Stadt und weil sich nach dem Tod des Hauptinitianten Robert Spleiss keine private Investoren für den Bau eines Thermalbades zur Nutzung dieser wertvollen Quelle finden liess, droht nun trotz Volksinitiative vom März 1995 mit 55%- Ja-Anteil für das Thermalbad an der Ecke Bellerive-Hornbachstrasse das Thermalwasser nicht mehr weiter genutzt zu werden.

Zur Zeit klärt die Electrowatt Engineering AG im Auftrag der Industriellen Betriebe der Stadt Zürich sowie des Bundesamtes für Energie ab, ob das Thermalwasser nicht zu Heizzwecken in der Nähe liegender Liegenschaften verwendet werden könnte. Die Resultate dieser Untersuchungen sind in dieser Studie festgehalten.

Grundsätzlich kommt das aus der Thermalbohrung Tiefenbrunnen geförderte Wasser für mehrere Wärmebezüger als Wärmequelle in Frage. Diese sind aus Figur 3.1 ersichtlich.

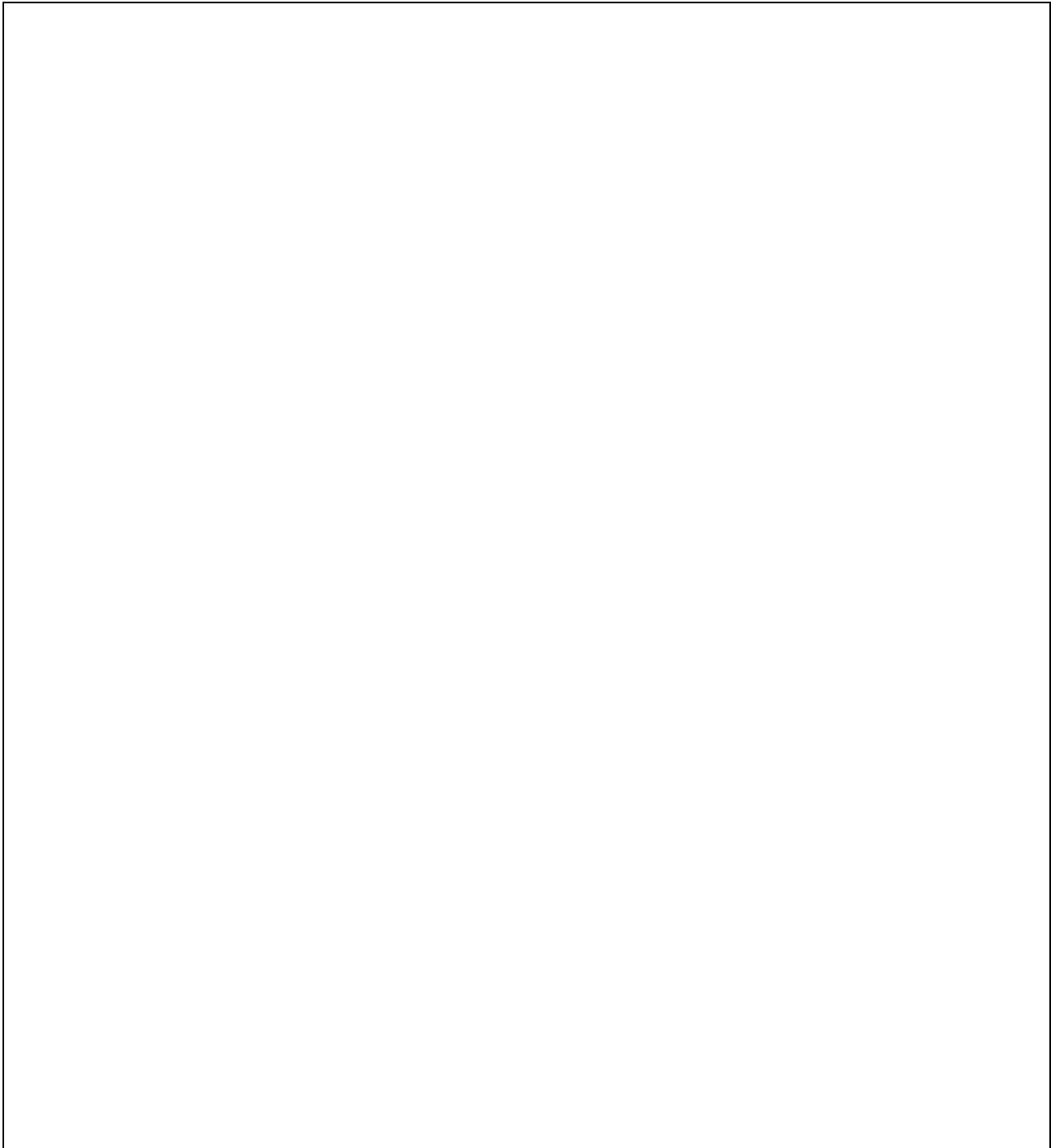
Als interessantester Verbraucher steht das Casino Zürichhorn zur Diskussion, das in 80 m Distanz von der Bohrung entfernt ist. Das Casino Zürichhorn wurde 1963 von der Stadt Zürich erstellt. Es umfasst ein Restaurant und einen grossen Saal und wird zur Zeit mit Öl beheizt. Die Gebäudehülle wie auch die Haustechnik entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen. Eine Gesamtanierung wurde mehrmals erwogen und wieder aufgeschoben. Der Heizkesslersatz lässt sich aufgrund der Luftreinhalteverordnung heute nicht mehr weiter aufschieben. Der Mietvertrag mit dem heutigen Pächter (Herr Wolf) läuft Ende 1998 aus und es ist zur Zeit unklar, wie das Casino Zürichhorn weiter betrieben werden soll (langjähriger Pächter, Vergabe im Baurecht, Art der Nutzung). Gemäss Vorgabe der Industriellen Betriebe der Stadt Zürich darf davon ausgegangen werden, dass der Heizenergiebedarf in Zukunft in der gleichen Grössenordnung bleibt wie heute.

Zusätzlich zum Casino Zürichhorn kommen als weitere Verbraucher am ehesten Liegenschaften jenseits der Bellerivestrasse in Frage.

Die Abklärungen haben ergeben, dass viele der untersuchten Gebäude als Wärmebezüger von Thermalwasser nicht geeignet sind, weil die Heizung erst kürzlich saniert wurde, weil der Wärmebedarf relativ gering ist oder weil sie mit Gas beheizt werden. Trotzdem verbleiben einige interessante Gebäude, die an ein Nahwärmenetz angeschlossen werden könnten. Im Vordergrund steht die Alterssiedlung Riesbach an der Dufourstrasse 146. Dieses Gebäude gehört ebenfalls der Stadt Zürich und weist einen relativ grossen Heizenergiebedarf auf. Es liegt in einer Entfernung von etwa 320 m von der Thermalbohrung und wird mit Öl beheizt.

Ein weiteres Beispiel möglicher Abnehmer von Thermalwasserwärme sind die Liegenschaften an der Baurstrasse 30-38. Diese 5 privaten Liegenschaften gehören alle der Immobiliengesellschaft Turicasa AG und könnten ebenfalls relativ einfach erschlossen werden.

Bei Anschluss aller 3 Wärmebezüger (Casino, Alterssiedlung, Baurstrasse) ist die Kapazität der Thermalbohrung noch nicht ganz ausgeschöpft, der Brunnen kann aber langfristig sicher betrieben und der Hilfsenergieverbrauch für die Förderung des Thermalwassers in vernünftigem Rahmen gehalten werden.



Figur 3.1: Mögliche Wärmebezüger der Thermalbohrung Tiefenbrunnen (Masstab 1:2500)

3.2. Ausbaupläne

Die Versorgung der potentiellen Wärmebezüger mit Thermalwasser kann zeitlich gestaffelt, oder gleichzeitig erfolgen, wobei auch der Anschluss nur eines Wärmebezügers denkbar ist. Welche Lösung gewählt wird, hängt primär von der Anschlusswilligkeit bez. den Kosten und der Wirtschaftlichkeit ab. Im Rahmen dieser Studie wurden 3 Ausbauetappen untersucht:

1. Etappe: Anschluss Casino Zürichhorn

2. Etappe: Anschluss Casino Zürichhorn + Alterssiedlung Riesbach

Vollausbau: Anschluss Casino + Alterssiedlung + Baurstrasse 30-38

3.3. Wärmeleistungs- und Energiebedarf

Der Wärmeleistungs- und Energiebedarf der Gebäude, welche mit Thermalwärme versorgt werden könnten, ist aus Tabelle 3.1 ersichtlich. Die Daten basieren auf Erhebungen über den jährlichen und zum Teil monatlichen Ölverbrauch sowie der Kenntnis der installierten Kesselleistungen.

Casino Zürichhorn		
Heizenergiebedarf	MWh/a	520
Energiebedarf Warmwasser	MWh/a	100
Nutzenergiebedarf total	MWh/a	620
Wärmeleistungsbedarf	kW	300
Alterssiedlung Riesbach		
Heizenergiebedarf	MWh/a	650
Energiebedarf Warmwasser	MWh/a	200
Nutzenergiebedarf total	MWh/a	850
Wärmeleistungsbedarf	kW	400
Baurstrasse 30-38		
Heizenergiebedarf	MWh/a	570
Energiebedarf Warmwasser	MWh/a	110
Nutzenergiebedarf total	MWh/a	680
Wärmeleistungsbedarf	kW	330

Tabelle 3.1: Leistungs- und Energiebedarf der potentiellen Wärmeabnehmer

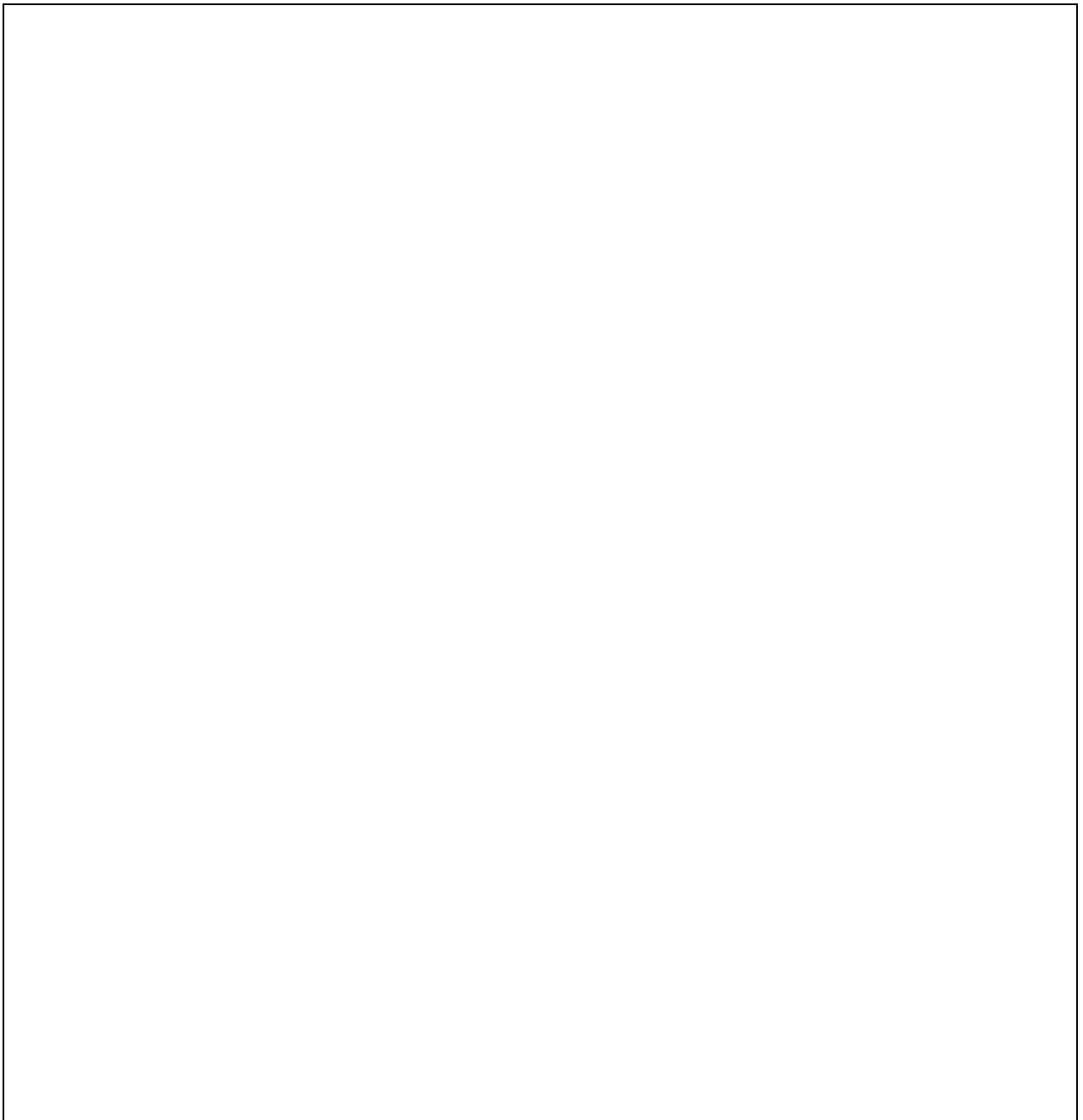
3.4. Vorhandene leitungsgebundene Energieträger

Das Gebiet, das für die Wärmeversorgung mit Thermalwasser in Frage kommt, ist stark mit Leitungen belegt. Im Strassengebiet befinden sich Gas-, Wasser-, Regenwasser-, Schmutzwasser-, EWZ-, und Swisscomleitungen. Um die Leitungsführung optimal planen zu können, wurden deshalb für sämtliche dieser Leitungen im interessierenden Gebiet Leitungserhebungen durchgeführt. Diese sind im Anhang 1 farblich eingezeichnet. Weitere Details z.B. Querschnitte der vorhandenen Leitungsträger und der Fernwärmeleitung im Bereich kritischer Durchquerungen im Strassen- und Hornbachgebiet befinden sich im Anhang 2. Die ersten Abklärungen haben ergeben, dass die Erschliessung der 3 Wärmebezüger (Casino, Alterssiedlung und Baurstrasse) vermutlich ohne grössere Probleme möglich ist.

4. Wärmegewinnung

4.1. Wärmequelle

Die Thermalwasserbohrung Tiefenbrunnen befindet sich auf dem Grundstück Kat.-Nr. 4673 in Zürich Riesbach, etwa 80 m vom Casino Zürichhorn entfernt. Die Bohrung wurde im Jahre 1980 realisiert und auf 736 m abgeteuft. Unterhalb -304 m ist die Bohrung mit einem Filterrohr versehen durch welches das Wasser aus der oberen Meeresmolasse mit einer in 285 m Tiefe eingebauten Pumpe gefördert wird (siehe Figur 4.1)



Figur 4.1: Geologisches Profil Massstab 1:5000

Die dem Brunnen entnehmbare Fördermenge kann in erster Näherung als linear mit der Absenkung angenommen werden. Die maximal zulässige Absenkung ist dabei auf etwa 270 m begrenzt.

Das Thermalwasser tritt entlang der geöffneten Strecke der Oberen Meeresmolasse, d.h. zwischen -327 und -712 m in den Brunnen ein. Die obersten Schichten führen dabei Wasser von einer Temperatur um 20 °C, im tiefsten Bereich wurden Temperaturen von über 30 °C gemessen. Als Mischtemperatur tritt das Thermalwasser mit etwa **26 °C** an die Oberfläche. Diese Temperatur ist leicht von der Fördermenge abhängig, darf aber in erster Näherung als konstant angenommen werden.

Die chemische Analyse des Thermalwassers, welche durch das Institut Bachema in Zürich ausgeführt wurde, hat ergeben, dass das Thermalwasser einen ähnlichen Chemismus aufweist, wie das Wasser der Brauerei Hürlimann (Aqui). Es erinnert stark an den Geschmack von Vichy-Wasser und weist eine hohe Mineralisation vor allem von Natrium und Chlorid auf. Es kann als **Natrium-Chlorid-Sulfat-Therme** bezeichnet werden (siehe Angang 3).

4.2 Abschätzung der langfristigen geothermischen Leistung

Die beim Verbraucher zur Verfügung stehende geothermische Leistung des Thermalwassers ist eine Funktion der Fördertemperatur, der Temperatur auf die das Thermalwasser abgekühlt wird, der Förderrate Q, sowie des Leistungsverlustes im Verteilungsnetz ΔP_{LV} :

$$P_{Geo} = \rho c_f \cdot Q \cdot (T - T_{abgekühlt}) - \Delta P_{LV}$$

ρc_f	=	spezifische Wärmekapazität von Wasser	$4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$
Q	=	langfristig mögliche Förderrate	m^3/s
T	=	Temperatur des Thermalwassers	K
$T_{abgekühlt}$	=	Temperatur auf die das Wasser abgekühlt wird	K
ΔP_{LV}	=	Leistungsverlust im Verteilungsnetz	W

Um die Wärmeleistung P_{Geo} beim Verbraucher langfristig zu gewährleisten, müssen folgende drei Faktoren berücksichtigt werden:

1. Gewährleistung der Förderrate Q:
2. Gewährleistung der Temperatur T des Thermalwassers:
3. Geringer thermischer Leistungsverlust zwischen Förderbohrung und Verbraucher:

Da die Unterwasserpumpe in der Bohrung nicht tiefer als -300 m u.OKT installiert werden kann, sollten die entsprechenden, aus der Förderung resultierenden abgesenkten Wasserspiegel langfristig eine Tiefe von -270 m u.OKT nicht überschreiten (Sicherheitsabstand 30 m). Ein Tiefersetzen der Pumpe ist nicht möglich, da ab -304 m u.OKT Filterrohre eingebaut sind. Dadurch ergäben sich in Pumpennähe hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Aquifer, was zu übermässigen Ablösungen von Feinteilen mit entsprechender Beeinträchtigung der Lebensdauer der Pumpe führen könnte.

4.2.1 Gewährleistung der Förderrate

4.2.1.1 Hydraulischer Zustand der OMM am Standort Tiefenbrunnen

Gemäss [Büchi, Bericht Nr. 1441] kann der Aquifer auf Grund des zweiten Pumpversuch vom 19.10.1981 bis 12.1.1982 durch folgende hydraulische Parameter charakterisiert werden:

Mittlere hydraulische Leitfähigkeit K	=	$2 \cdot 10^{-7}$ m/s
Hydraulisch aktive Mächtigkeit M, geschätzt	=	200 m
Daraus berechnete Transmissivität	=	$4 \cdot 10^{-5}$ m ² /s
Bohrlochradius	=	0,114 m
Der Wasserspiegel lag 1981 ca. 13 m u. OKT.		

Nachrechnungen der gemessenen Wasserspiegelabsenkungen des zweiten Pumpversuch für einen unendlich ausgedehnten, nach dem Liegenden und Hangenden vollständig dichten Aquifer haben gezeigt, dass die Transmissivität effektiv etwas besser und die hydraulisch aktive Schicht leicht grösser ist. (siehe Figur 4.2)

Für die weiteren Berechnungen (instationäre analytische Lösung für eine Brunnenanströmung nach Theis) wurden deshalb nachstehende Parameter verwendet:

Mittlere hydraulische Leitfähigkeit K	=	$2 \cdot 10^{-7}$ m/s
Hydraulisch aktive Mächtigkeit M, angepasst	=	250 m
Daraus berechnete Transmissivität	=	$5 \cdot 10^{-5}$ m ² /s
Bohrlochradius	=	0,114 m
Berechneter spezifischer Speicherkoeffizient	=	$1,6 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹
(für eine mittlere Porosität von 15%)		

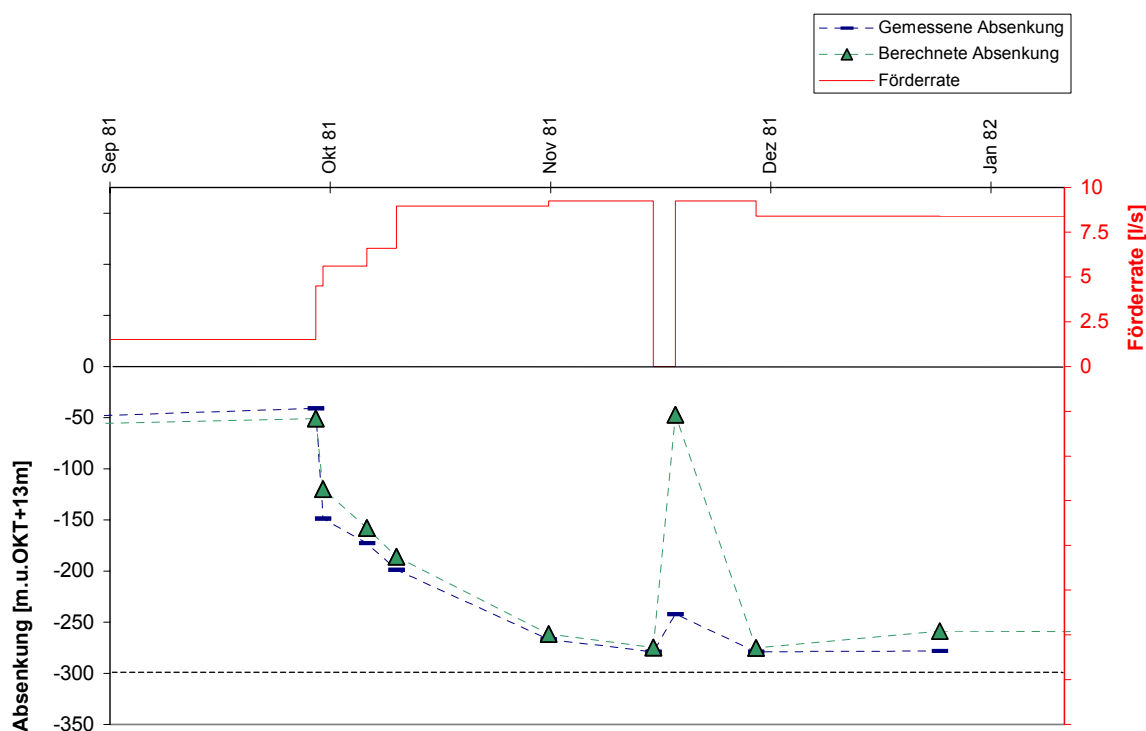


Fig. 4.2: Gemessene und berechnete Wasserspiegelabsenkungen im 2. Pumpversuch

Mit diesen Parametern ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Die ausserordentlich langsame Erholung des Wasserspiegels im Bohrloch nach Pumpstopp kann allerdings nicht erklärt werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das hydraulische Verhalten der Bohrung Tiefenbrunnen auch durch die 2 Bohrungen der Brauerei Hürlimann AG beeinflusst wird.

Gemäss telefonischer Angabe der Brauerei Hürlimann betragen die Förderraten in den beiden ca. 2,5 km entfernten Aqvi-Bohrungen durchschnittlich 2,8 l/s aus der 1. Bohrung (seit ca. 1975) und 4,5 l/s aus beiden Bohrungen zusammen (seit ca. 1989).

Diese Fördermengen beeinflussen den Standort Tiefenbrunnen wie folgt:

1. Der gemessene "echte Ruhewasserspiegel" in der Bohrung Tiefenbrunnen war bereits 1980 um ca. 9 m abgesenkt.
2. Der hydraulische Einfluss der Aqvi-Förderung äusserst sich in der Bohrung Tiefenbrunnen in einer Wasserspiegelabsenkung von ca. 22 m (gültig 1997).

Für die langfristige Prognose der Wasserspiegelabsenkung in der Bohrung Tiefenbrunnen müssen daher die Förderungen in den Aqvi-Bohrungen mit berücksichtigt werden.

Genau so wird auch der Wasserspiegel in den beiden Aqvi-Bohrungen durch die Förderung in der Bohrung Tiefenbrunnen beeinflusst. Unter Annahme eines homogenen Aquifers mit ausreichender Ausdehnung kann davon ausgegangen werden, dass dieser Einfluss auf Grund der ähnlichen Förderraten in der gleichen Grössenordnung ist. Das grossräumige hydraulische Verhalten des Aquifers müsste darum vor allem im Hinblick auf eine langfristige Nutzung in den Bohrungen Tiefenbrunnen und Aqvi mangels Messdaten mit Wasserspiegelmessungen untersucht werden.

4.2.1.2. Einfluss der Nutzung auf die Hydraulik

Für die Deckung des Energiebedarfs der verschiedenen Gebäude muss der Bohrung Tiefenbrunnen eine bestimmte Energiemenge entzogen werden. Diese Energiemenge ist abhängig von Ausbautetappe, Jahreszeit und Betrieb des Brunnens. Je nach Nutzungsszenario ergibt sich damit ein zeitabhängiger geothermischer Energiebedarf, der im Prinzip auf zwei Betriebsarten gedeckt werden kann:

1. Variable Förderrate in einem 24-h Förderbetrieb
2. Konstante Förderrate während einer bestimmten Anzahl Stunden/Tag

In Tabelle 4.1 und 4.2 sind die monatlichen Energiemengen, die dem Brunnen in den verschiedenen Ausbautetappen entzogen werden müssen, für die beiden Betriebsarten 1 und 2 angegeben. Die Entzugsmengen basieren auf dem jährlichen Heizenergiebedarf der 3 Liegenschaften Casino, Alterssiedlung und Bauerstrasse und wurden berechnet unter bestimmten Annahmen über Lastprofil, Arbeitszahl und Aufteilung von Wärmepumpe und Spitzenkessel. Nähere Details dazu finden sich in Tabelle 5.5.

In den Tabellen 4.1 und 4.2 sind auch die entsprechenden Fördermengen und Laufzeiten der Förderpumpe enthalten. Für die Umrechnung des monatlichen geothermischen Energiebedarfs auf die Förderraten, resp. Betriebsstunden/Tag wurde davon ausgegangen, dass das Thermalwasser beim Verbraucher von 24°C auf 9°C abgekühlt wird.

Aus den Fördermengen und zugehörigen Laufzeiten lassen sich mit Hilfe der instationären analytischen Lösung für eine Brunnenanströmung (Theis-Lösung) die in den Figuren 4.3 und 4.4 dargestellten zyklischen Wasserspiegelabsenkungen errechnen. Bei der Theis Lösung wird davon ausgegangen, dass es sich um einen vollkommenen Brunnen in einem homogenen, unendlich ausgedehnten Aquifer gleich bleibender Mächtigkeit ohne Zusickerung aus dem Liegenden und Hangenden handelt. Mit berücksichtigt ist dabei der hydraulische Einfluss der Förderungen aus den Aquibohrungen seit 1975, sowie die Förderungen in der Bohrung Tiefenbrunnen selber seit 1981 (Förderraten 1981-88: 8,4 l/s; 1988-98: 5,7 l/s; teilweise geschätzte Maximalannahmen).

Betriebsart 1: Variable Förderrate in einem 24-h Förderbetrieb:

	Geothermischer Energiebedarf [MWh]			24-h Förderung mittlere monatliche Förderrate [l/s]		
	Etappe 1	Etappe 2	Etappe 3	Etappe 1	Etappe 2	Etappe 3
Januar	61	142	209	1.44	3.35	4.94
Februar	52	121	178	1.23	2.86	4.20
März	49	114	167	1.16	2.69	3.94
April	31	73	106	0.73	1.72	2.50
Mai	15	38	55	0.35	0.90	1.30
Juni	8	22	31	0.19	0.52	0.73
Juli	7	20	27	0.17	0.47	0.64
August	7	20	28	0.17	0.47	0.66
September	10	27	38	0.24	0.64	0.90
Oktober	23	56	81	0.54	1.32	1.91
November	47	110	161	1.11	2.60	3.80
Dezember	62	143	210	1.46	3.38	4.96

Tab 4.1: monatliches geothermisches Lastprofil bei Betriebsart 1

Betriebsart 2: Konstante Förderrate während einer bestimmten Anzahl Stunden/Tag:

	Geothermischer Energiebedarf [MWh]			konstante Förderrate [l/s]			Laufzeiten der Pumpe	
	Etappe 1	Etappe 2	Etappe 3	Etappe 1	Etappe 2	Etappe 3	h/Monat	h/Tag
Januar	61	142	209	1.7	4	5.9	613	19.8
Februar	52	121	178	1.7	4	5.9	520	17.9
März	49	114	167	1.7	4	5.9	488	15.7
April	31	73	106	1.7	4	5.9	303	10.1
Mai	15	38	55	1.7	4	5.9	150	4.8
Juni	8	22	31	1.7	4	5.9	82	2.7
Juli	7	20	27	1.7	4	5.9	68	2.2
August	7	20	28	1.7	4	5.9	71	2.3
September	10	27	38	1.7	4	5.9	102	3.4
Oktober	23	56	81	1.7	4	5.9	232	7.5
November	47	110	161	1.7	4	5.9	467	15.6
Dezember	62	143	210	1.7	4	5.9	616	19.9
Geothermische Leistung				100 kW	233 kW	343 kW		

Tab 4.2: monatliches geothermisches Lastprofil bei Betriebsart 2

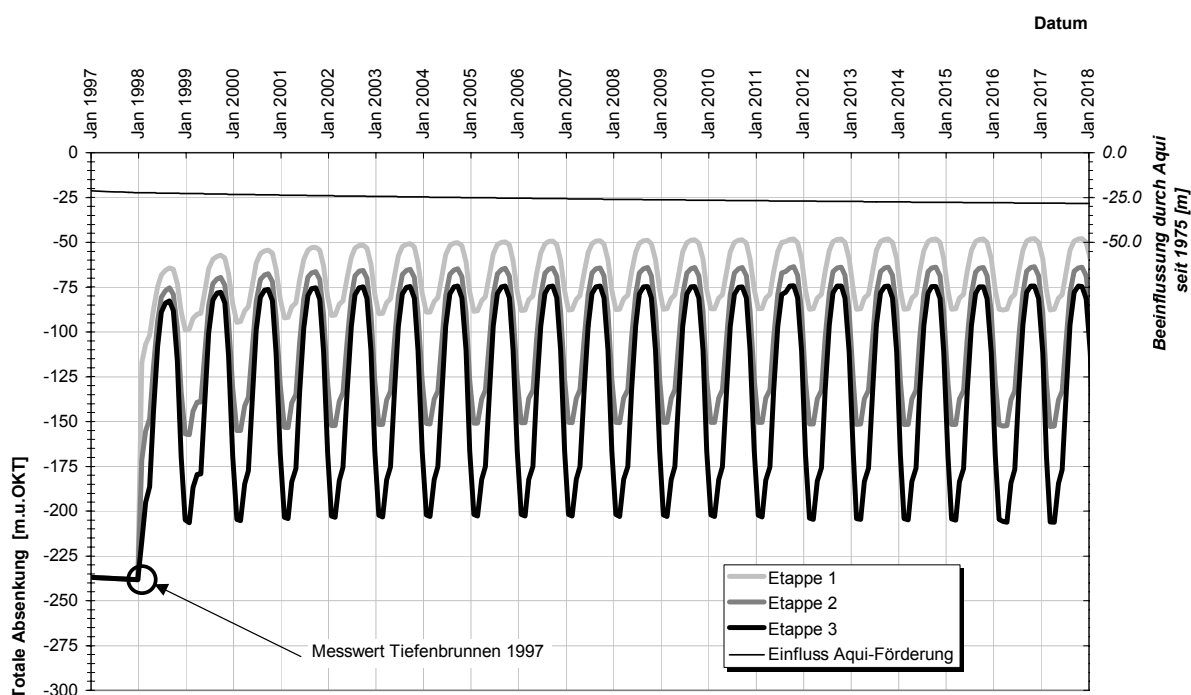


Fig 4.3: Berechnete Absenkungen des Wasserspiegels in der Bohrung Tiefenbrunnen bei Betriebsart 1 (24h-Förderbetrieb mit variabler Förderrate)

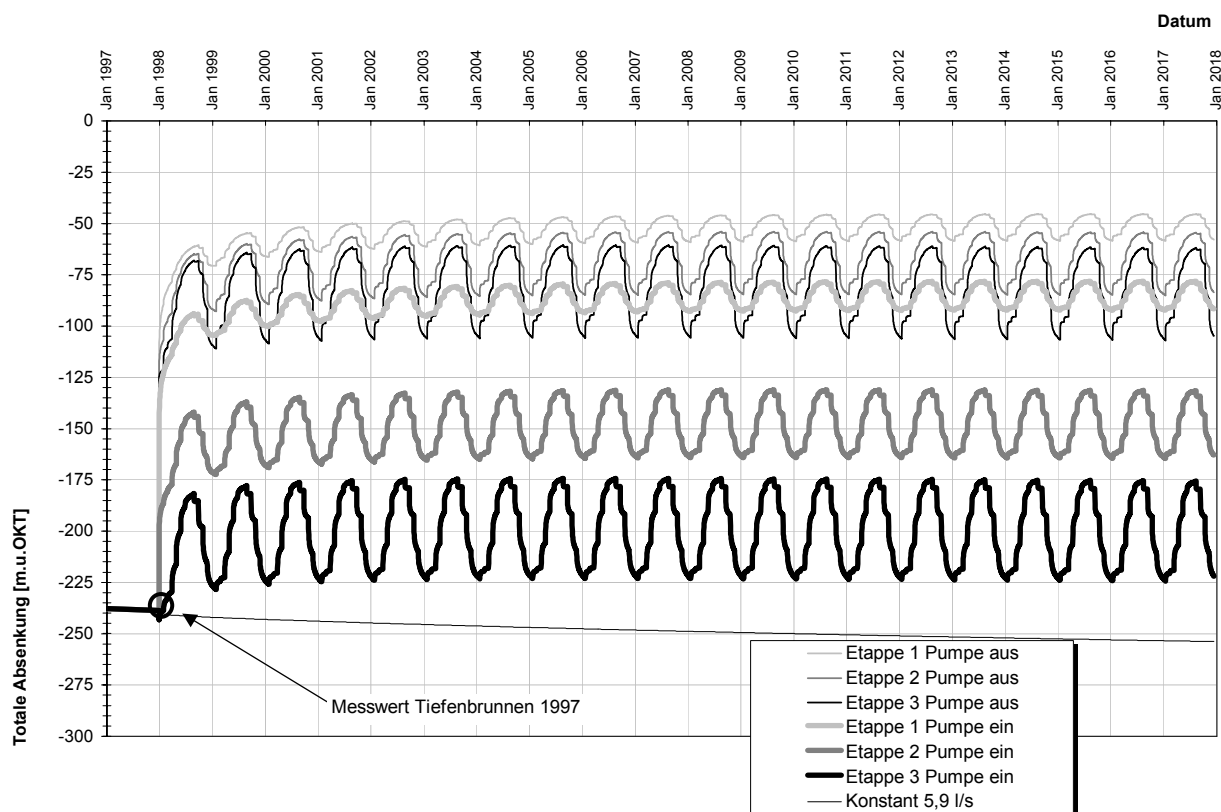


Fig 4.4: Berechnete maximale und minimale Absenkungen des Wasserspiegels in der Bohrung Tiefenbrunnen (Hüllkurven der täglichen Wasserspiegeloszillationen) bei Betriebsart 2 (täglich begrenzte Förderdauer mit konstanter Förderrate), sowie einer konstanten Förderung mit 5,9 l/s

Die sich aus den Berechnungen ergebenden maximalen langfristigen Absenkungen des Wasserspiegels sowie die notwendige Installationstiefe der Unterwasserpumpe, um ein Trockenlaufen zu verhindern, sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Betriebsart 1	Etappe 1	Etappe 2	Etappe 3
Maximale Absenkung [m.u.OKT]	-90	-155	-205
Installationstiefe der Unterwasserpumpe [m.u.OKT]	-120	-185	-235
Betriebsart 2			
Maximale Absenkung [m.u.OKT]	-95	-162	-225
Installationstiefe der Unterwasserpumpe [m.u.OKT]	-125	-190	-255

Tabelle 4.3 maximale Absenkung des Wasserspiegels und notwendige Installationstiefe der Unterwasserpumpe

Wie die Tabelle 4.3 zeigt, hat die Betriebsart nur einen bescheidenen Einfluss auf die maximale Absenkung. Die Einbautiefe der Förderpumpe wird dagegen ganz entscheidend durch den Ausbaugrad beeinflusst. Bei einer Wärmeversorgung nur des Casino Zürichhorn muss die Tauchpumpe in etwa 120 m, im Vollausbau dagegen in 250 m Tiefe eingebaut werden.

Eine offene Frage bleibt die theoretisch zu geringe Erholung des Wasserspiegels in der Bohrung Tiefenbrunnen beim 2. Pumpversuch. Wie ein Vergleich der gemessenen Absenkwerte mit den berechneten Werten in Figur 4.2 zeigt, erwuchs daraus aber kein nachteiliges Verhalten der Brunnenhydraulik in den darauffolgenden Absenkphasen. Mit einem zusätzlichen Absenkeffekt aufgrund des fehlenden Wiederanstiegs muss daher nicht gerechnet werden.

4.2.1.3 Ergiebigkeitsreserven

Im Zusammenhang mit der Nutzung der Bohrung Tiefenbrunnen stellt sich die Frage, ob der Brunnen im Vollausbau noch eine Reserve aufweist, oder ob die Kapazität bereits ausgeschöpft ist.

In der Figur 4.5 sind die maximalen Förderraten mit den entsprechenden maximalen Absenkungen (die bei einem zyklischen Betrieb nicht zeitlich zusammenfallen) für die folgenden Fälle aufgetragen.

- Messwerte aus Pumpversuch 1,2 und Messung 1997
- berechnete Werte für Betriebsart 1 und 2, drei Jahre und 20 Jahre nach Nutzungsbeginn, jeweils ein Wert pro Ausbaustufe
- berechneter Wert für eine konstante Jahresförderung mit 5.9 lit./s (zum Vergleich zu Betriebsart 2)

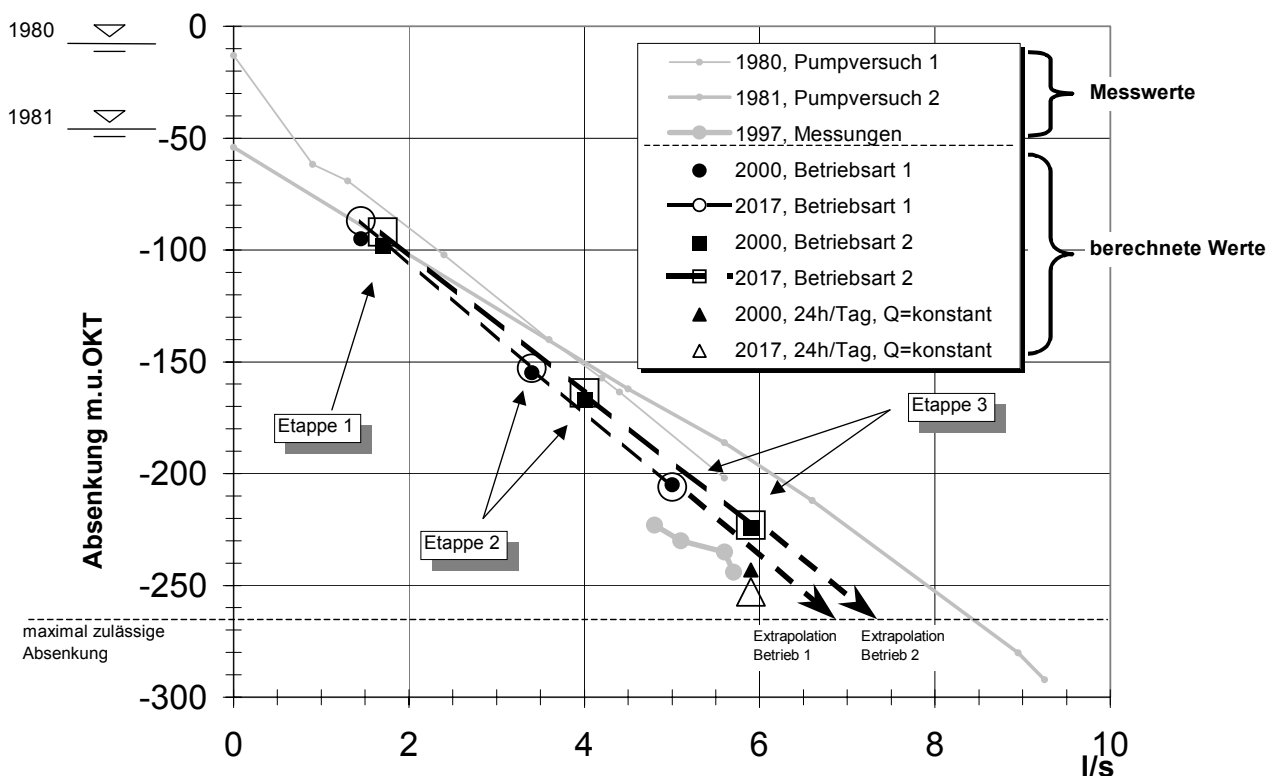


Fig 4.5: Entwicklung der Brunnenergiebigkeit für die verschiedenen Betriebsarten

Basierend auf diesen Daten lassen sich unter der Annahme, dass der Wasserspiegel im Brunnen auf max. 270 u. OKT abgesenkt werden kann, die maximal zulässigen Förderarten resp. Ergiebigkeitsreserven aus Figur 4.5 extrapolieren (Pfeile). Diese sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Betriebsart	Berechnete max. Absenkung [m.u.OKT]	Förderrate für Berechnung [lit./s]	Förderrate extrapoliert bis -270 m.u.OKT	Ergiebigkeitsreserve
Betriebsart 1	-205	4,96	7 (Figur 4.5)	40%
Betriebsart 2	-225	5,9	7,3 (Figur 4.5)	25%
Konstant 5,9 l/s	-255	5,9	6,5 (berechnet)	<10%

Tabelle 4.4: Ergiebigkeitsreserven in Abhängigkeit der Betriebsart

Es zeigt sich, dass die Reserve massgeblich von der Betriebsart des Brunnens abhängig ist. Die Betriebsart 1 mit einer kontinuierlichen Förderung des Thermalwassers während 24 h pro Tag, stellt den günstigsten Fall dar. In diesem Fall muss nie mehr als 4.96 lit./s gefördert werden und es ist noch eine Reserve von 40 % vorhanden. In der Betriebsart 2 schrumpft die

Reserve auf 25 % und im ungünstigsten Fall, einem Dauerbetrieb von 8760 h pro Jahr mit einer Fördermenge von 5.9 lit./s ist nur noch eine Reserve von 10 % vorhanden.

Diese Ergebnisse bedeuten, dass die Kapazität des Brunnens im Vollausbau (Anschluss Casino, Alterssiedlung und Baurstrasse) nicht ganz ausgeschöpft ist. Trotzdem wird aber empfohlen, keine weiteren Verbraucher mit Thermalwasser zu versorgen, da der Energiebedarf der Tauchpumpe bei grösserer Förderrate unverhältnismässig stark ansteigen würde.

Als Schlussfolgerung kann gesagt werden, dass unter Berücksichtigung der zur Zeit vorhandenen Daten für alle drei Ausbautappen die jeweils erforderlichen Förderraten vom hydraulischen Standpunkt her auch langfristig (mindestens 20 Jahre) gewährleistet sind.

Im Hinblick auf eine mögliche Nutzung mit Pumpunterbrüchen stellt sich aber die Frage, inwiefern sich Feinanteile bei Wiederaufnahme der Förderung aus dem Aquifer lösen. Dadurch könnten sich die Filterrohre verkrusten, was zu einer Ergiebigkeitsabnahme des Brunnens führt. Zudem verringert sich dadurch die Lebensdauer der Pumpe. Aus dem Pumpprotokoll des 2. Pumpversuchs 81/82 ist zu entnehmen, dass das Wasser in den ersten paar Stunden nach Testbeginn trüb war. Inwiefern sich heute, nach einer mehrjährigen, permanenten Förderung, immer noch Feinanteile nach einem Pumpstart aus dem Aquifer lösen, muss bei Weiterverfolgung des vorliegenden Projektes getestet werden. Dieser Test könnte unter Umständen auch mit der bereits installierten Pumpe durchgeführt werden.

Die idealste Betriebsart ist der Dauerbetrieb mit variabler Förderrate (Betriebsart 1), sowohl im Hinblick auf die jährliche Pumparbeit, als auch in Bezug auf die Ergiebigkeitsreserve und Ergiebigkeitserhaltung des Brunnens. Der dazu erforderliche Bereich der Drehzahlregulierung der Unterwasserpumpe wird aber durch herkömmliche Produkte nicht erreicht (Regulierungsbereich ca. 50% der Maximallast). Damit ergäbe sich eine gemischte Betriebsart, wodurch die Werte bezüglich Absenkung und Installationstiefe der Unterwasserpumpe zwischen Betriebsart 1 und 2 liegen.

Würde sich nach entsprechenden Tests bezüglich der Feinanteilablösung zeigen, dass Pumpunterbrüche vermieden werden müssen, bestünde allenfalls die Möglichkeit, das trotz der Drehzahlregulierung anfallende überschüssige Wasser im Sommer weiterhin an die Badeanstalt Tiefenbrunnen, resp. an den Kugelbrunnen und Ententeich abzugeben.

4.2.2 Gewährleistung der Wassertemperatur

Eine Abnahme der Fördertemperatur kann zwei Ursachen haben: [Mégel 1996]

1. Seitliche Anströmung von kälterem Wasser:

Beisst der Aquifer in ein Oberflächengewässer, resp. oberflächennahes Grundwasser aus, so wird, sobald der Entnahmetrichter den Ausbiss erreicht, kälteres Wasser angeströmt. Die Berechnung des minimalen Abstandes D zu einem solchen Ausbiss beträgt für eine Förderrate von konstant 2,6 l/s (Jahresdurchschnitt von Etappe 3) und einer Aquifermächtigkeit von 250 m lediglich etwa 100 m. Da der nächst gelegene Ausbiss der OMM einige km entfernt liegt, ist eine Abnahme der Fördertemperatur auf Grund von seitlich anströmendem Kaltwasser auszuschliessen.

2. Zusickerung von kälterem Wasser aus dem Hangenden in den Aquifer:

Eine temperaturrelevante Zusickerung aus dem Hangenden in den Aquifer findet nur dann statt, wenn der Zahlenwert der vertikalen hydraulischen Leitfähigkeit des Hangenden K' höchstens 1000 mal kleiner ist als derjenige der Transmissivität T_r des Aquifers. Oberhalb von -310 m u. OKT wird die Obere Meeresmolasse durch die Mergelschichten der Oberen

Süsswassermolasse OSM abgedichtet. Da die vertikale hydraulische Leitfähigkeit der OSM als $< 10^{-10}$ m/s angenommen werden kann, ist das Verhältnis T_r/K' $> 400'000$, wodurch eine Zusickerung von kälterem Wasser aus der OSM ausgeschlossen werden kann.

Ein Vergleich der Wassertemperaturen während des 1. und des 2. Pumpversuchs zeigte, dass eine Abhängigkeit zwischen Förderrate und Temperatur besteht. Bei einer Förderrate von 5,6 l/s betrug die Wassertemperatur 24,8°C, während bei 8,6 l/s die Temperatur bei 25,3°C lag. Da Wasserzutritte im Bohrloch Tiefenbrunnen praktisch über die gesamte Mächtigkeit der OMM verteilt sind, wobei sich die Wassertemperatur je nach Tiefenlage zwischen 20 bis über 30°C bewegt, handelt es sich bei der Fördertemperatur immer um eine Mischtemperatur.

Diese Abhängigkeit zwischen Förderrate und Temperatur lässt sich durch zwei Prozesse erklären:

1. Abkühlung im Steigrohr:

Je grösser die Förderate ist, umso weniger Zeit steht dem Wasser während des Aufstiegs zur Verfügung, um Wärme an die kühlere Umgebung abzugeben. Zudem ist infolge der grösseren Absenkung ein grösserer Teil des Steigrohrs von Luft umgeben, die gut isoliert.

2. Zusickerung von wärmerem Wasser aus der USM in die OMM:

In [Mégel 1996] wird gezeigt, dass die Wassertemperatur mit zunehmender Förderrate abnimmt, wenn das Hangende eines Aquifers besser durchlässig ist als das Liegende. Umgekehrt nimmt die Wassertemperatur mit der Förderrate zu, wenn die unterliegenden Schichten eines Aquifers weniger dicht sind als dessen Hangendes. Möglicherweise sind die obersten Schichten der USM nicht gleich undurchlässig wie die OSM. Da die Filterrohre die obersten Schichten der OSM nicht erfassen, wird dessen Wasser durch den Förderstrom nicht radial in den Brunnen angeströmt, sondern über die untersten Schichten der OMM durch vertikale Zusickerung. Die Temperatur dieses vertikal zusickernden Wassers in der OMM ist um so grösser, je schneller das Wasser vertikal fliesst. Dessen Volumenanteil am gesamten Wasseraustritt aus der unteren OMM in den Brunnen ist zwar unabhängig von der Förderrate, hingegen nimmt dessen Temperatur mit der Förderrate zu, wodurch sich auch die Mischtemperatur an Bohrkopf erhöht.

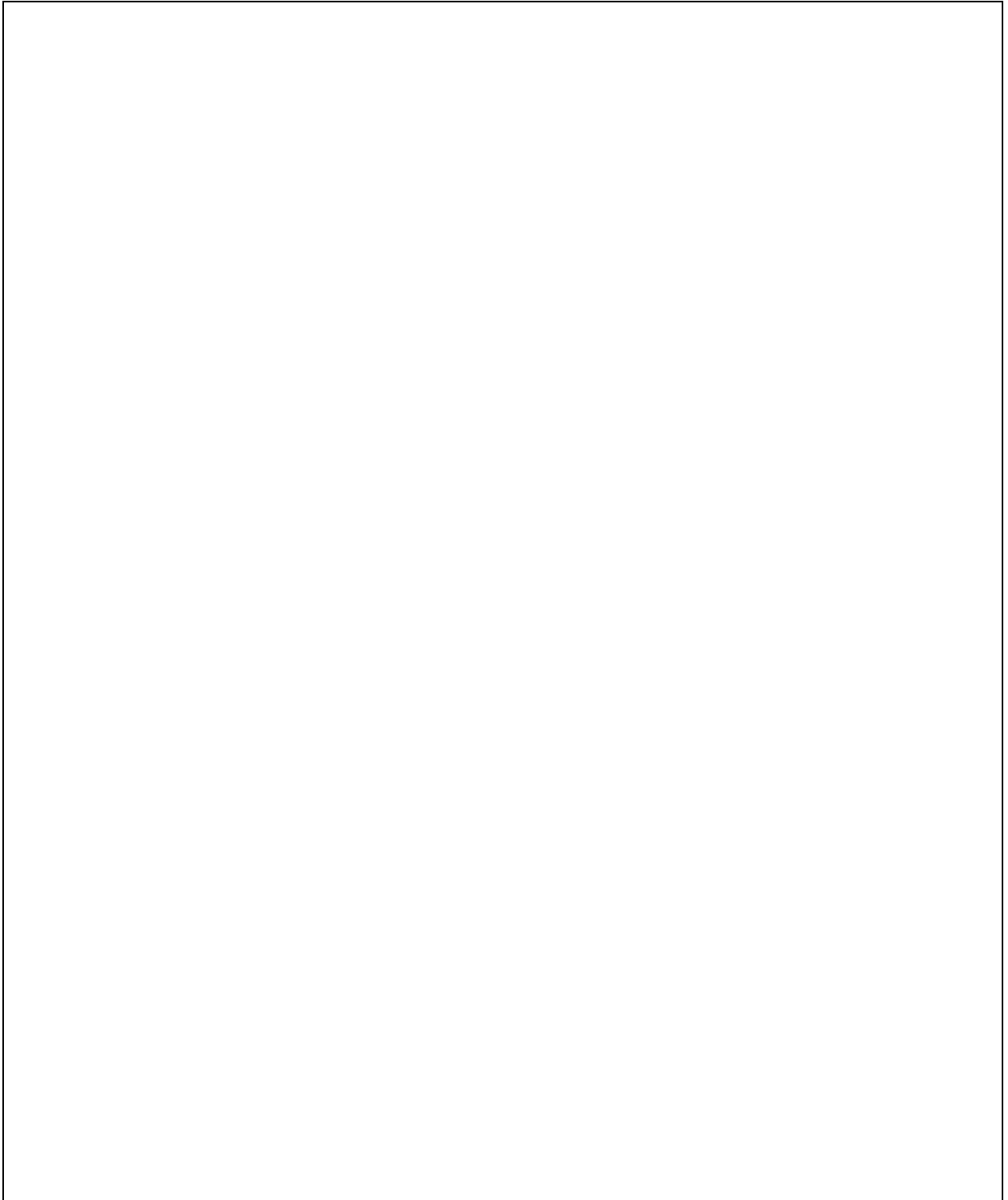
Der Temperatureffekt liesse sich auch durch gleiche Prozesse auf Grund von vertikalen Inhomogenitäten in der OMM selber zurückführen.

Der Umstand, dass sich bei einer Erhöhung der Förderrate die Temperatur sehr rasch auf einen konstanten, höheren Wert eingestellt hat, lässt aber darauf schliessen, dass solche förderbedingte Aufwärtsbewegungen von Wasser nur in Schichten mit vergleichsweise geringer Mächtigkeit auftreten. Dass die OMM (u. U. unter Miteinbeziehung der obersten USM) als ganzes als ein nach dem Hangenden und Liegenden dichter Aquifer angesehen werden kann, wird auch durch die gute Anpassung des 2. Pumpversuchs mit der Theis-Lösung bestätigt.

Diese Abschätzungen lassen den Schluss zu, dass auch langfristig mit keiner Temperaturabnahme zu rechnen ist.

4.3.Fassung des Thermalwassers

Das Thermalwasser wird heute mit einer Unterwasserpumpe Typ Pleuger an die Oberfläche gefördert (siehe Figur 4.6).



Figur 4.6: Längsschnitt und Querschnitt mit Austritt und Fassung des Thermalwassers

Die Unterwasserpumpe wurde dazumal für die maximal mögliche Förderleistung von 8 lit./s ausgelegt und weist einen entsprechend hohen elektrischen Leistungsbedarf (45 kW) auf. Sie

ist im Falle einer Nutzung des Thermalwassers zu Heizzwecken überdimensioniert und auch zu alt, so dass sie durch eine den neuen Verhältnissen angepasste Pumpe (eventuell drehzahlreguliert) ersetzt werden muss. Weil bei kleinerer Förderleistung der Grundwasserspiegel nicht mehr so weit abgesenkt und daher die Unterwasserpumpe näher an der Oberfläche eingebaut werden kann, muss die Förderleitung entsprechend verkürzt werden. Dies ist problemlos möglich, da diese aus jeweils 6 m langen Einzelstücken, die zusammen geflanscht sind, zusammen gesetzt ist.

In baulicher Hinsicht sind nur geringfügige Anpassungen notwendig, so dass der bestehende Brunnenschacht (siehe Figur 4.6) auch im Falle einer anderen Nutzung direkt verwendet werden kann.

4.4 Entsorgung des Thermalwassers

Theoretisch kann die Entsorgung des Thermalwassers nach dessen Nutzung auf 3 verschiedene Arten gelöst werden.

- Einleitung in Hornbach
- Einleitung in Kanalisation
- Einleitung in Zürichsee

Welche Variante zum Zuge kommt, ist abhängig von den Vorschriften bezüglich der Einleitung in öffentliche Gewässer und von den Kosten. Die einzuhaltenden Vorschriften sind festgehalten in der eidgenössischen **Verordnung über Abwassereinleitungen** und den Erläuterungen zur Bewilligungspraxis im Kanton Zürich (**Nutzung von Oberflächen- und Grundwasser sowie Abwasser und Boden zu Heiz- und Kühlzwecken**). In jedem Fall ist vorgängig der Nutzung eine gewässerschutzrechtliche und wasserbaupolizeiliche Bewilligung einzuholen.

4.41 Einleitung in Hornbach

Gemäss der Verordnung über Abwassereinleitungen darf die Wassertemperatur bei der Einleitung in ein Fließgewässer oder einen Flusstau 30 °C nicht überschreiten. Weiter darf die Temperaturveränderung im Gewässer als Folge dieser Einleitungen insgesamt nicht mehr als **1 °C** betragen. Zudem muss beachtet werden, dass geothermisches Wasser infolge des Gehaltes an gelösten chemischen Komponenten meist nicht in grösseren Mengen in Gewässer eingeleitet werden kann.

Kritisch in bezug auf die Temperaturveränderung muss der Winterfall betrachtet werden, wenn der Hornbach eine minimale Wasserführung und tiefe Temperatur um die 0 °C aufweist. Gemäss Auskunft von Herrn Niederer von der Sektion Fischerei und Jagdverwaltung vom AWEL muss im Extremfall von einer minimalen Wassermenge im Hornbach von 13 lit. /s (1 lit./s km² * 13 km²) ausgegangen werden. Bei einer Thermalwassermenge von 6 lit. /s und einer Rückgabetemperatur von 9 °C ergäbe sich in diesem Fall eine Erwärmung um 3 °C.

Die zulässigen Sulfat,- und Chlorid -Frachten liegen bei 100 mg/lit. Im Vergleich zu den gemessenen Werten von 1200 mg Cl⁻ und 893 mg SO₄²⁻ pro Liter müsste das Thermalwasser damit um einen Faktor 9 bis 12 verdünnt werden (siehe Anhang 3).

Nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Chemismus her ist eine Einleitung von Thermalwasser in den Hornbach daher prinzipiell nicht möglich. Wegen der kurzen Distanz zwischen Einleitung und See (siehe Figur 4.7) muss dieser Punkt allerdings nochmals überprüft werden.

4.42 Einleitung in Kanalisation

Eine naheliegende Variante der Entsorgung stellt auch die Einleitung in die Kanalisation dar. Im Versorgungsgebiet ist grösstenteils das Trennsystem vorhanden, so dass das Thermalwasser in den Regenwasserkanal eingeleitet und die Abwasserreinigungsanlage ARA nicht zusätzlich belastet werden müsste. Diese Lösung hätte den Vorteil, dass das Thermalwasser im Einrohr System zu den Verbrauchern geführt und dann direkt entsorgt werden könnte. Aus zweierlei Gründen ist diese Lösung aber nicht praktikabel.

In der Verordnung über Abwassereinleitung ist als Anforderung an die Einleitung in die öffentliche Kanalisation ein Grenzwert für die Sulfate von 300 mg SO_4^{2-} pro Liter festgehalten. Dieser Wert ist um einen Faktor 3 tiefer als der gemessene Wert.

Als zweites Problem ergibt sich die Tatsache, dass die Einleitung in die Kanalisation nicht gratis ist. Gemäss Auskunft der Stadtentwässerung ist in der Verordnung über die Abwassergebühr festgehalten, dass pro m^3 Abwasser 1.125 Fr. für die Entsorgung bezahlt werden muss. Dieser Betrag ist gültig im Falle einer Einleitung in den Regenwasserkanal, bei Einleitung in den Schmutzwasserkanal würden sich die Kosten sogar verdoppeln.

Solche Gebühren belasten die Wirtschaftlichkeit der Thermalwassernutzung in einem nicht mehr vertretbaren Ausmass. Allein schon für eine Wärmeversorgung des Casino Zürichhorn werden 24170 m^3 Thermalwasser pro Jahr benötigt. Diese Menge erhöht sich im Vollausbau sogar auf 84'000 m^3 pro Jahr. Die Einleitung in die Kanalisation ist daher nicht nur wegen der Verletzung der Einleitungsbedingungen, sondern auch von den Kosten her nicht machbar.

4.43 Einleitung in Zürichsee

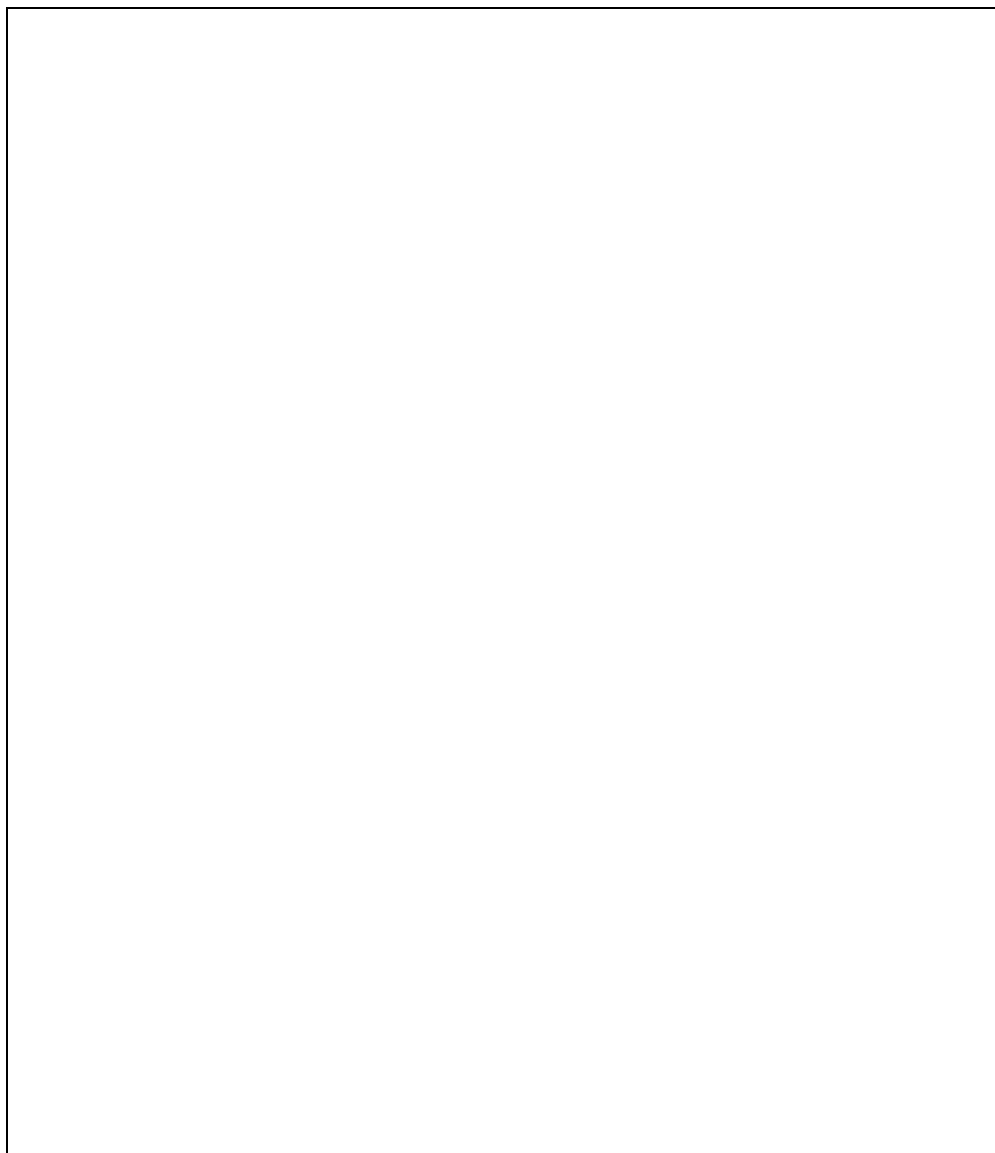
Als einzig gangbare Lösung verbleibt, abgesehen von einer sehr kostspieligen Reinjektion des abgekühlten Thermalwassers in eine zweite Bohrung, die Einleitung in den Zürichsee. Zwar müssen auch bei einer Rückführung in den See die entsprechenden Vorschriften eingehalten werden. So verlangt die eidg. Verordnung über Abwassereinleitungen den Nachweis, dass durch die Nutzung des Wassers zu Kühlzwecken die natürlichen Mischungsverhältnisse im See nicht nachteilig verändert werden dürfen. Es muss deshalb zur Beurteilung eines konkreten Projektes eine Modellrechnung durchgeführt und dem Amt für Gewässerschutz und Wasserbau vorgelegt werden.

Für den Betrieb des Kugelbrunnens wird das warme Thermalwasser heute von der Fassung in einer Leitung PE 75 zum Kugelbrunnen und von dort weiter in einer Leitung PE 63 in den Ententeich und dann in den See geführt (siehe Figur 4.7). Offensichtlich hat die Rückführung dieses Thermalwassers bis jetzt zu keinen Problemen geführt.

Rechtlich gesehen wurde der Stadt Zürich im Regierungsratsbeschluss RRB Nr. 2067/1986 vom Jahre 1986 das Recht verliehen, aus der Bohrung Tiefenbrunnen 600 lit./min resp. 10 lit./s Wasser zu entnehmen und für den Betrieb eines Thermalbades sowie von Wärmepumpen zu nutzen. Weiter wurde am 16. Mai 1988 auch einer Nutzungsänderung zugestimmt, wo es der

Wasserversorgung der Stadt Zürich erlaubt wurde, das geförderte Wasser zum Betrieb eines Kugelbrunnens zu nutzen, den sie aus der Phänomene-Ausstellung erworben hatte. Für diese Nutzung wurde eine gewässerschutzrechtliche und wasserbaupolizeiliche Bewilligung für die Einleitung des durch den Kugelbrunnen fliessenden Thermalwasser in den Hornbach bez. nach Passieren des Ententeiches in den Zürichsee erteilt.

Auf Grund dieser Tatsachen wird für die weiteren Überlegungen davon ausgegangen, dass für die Einleitung in den Zürichsee auch im Falle einer Nutzung zu Heizzwecken die Situation ähnlich bleibt und eine Konzession erteilt wird. (siehe Anhang 4)



Figur 4.7: Situationsplan mit Entsorgung des Thermalwassers vom Brunnen über den Ententeich in den Zürichsee

4.5. Leitungsführung

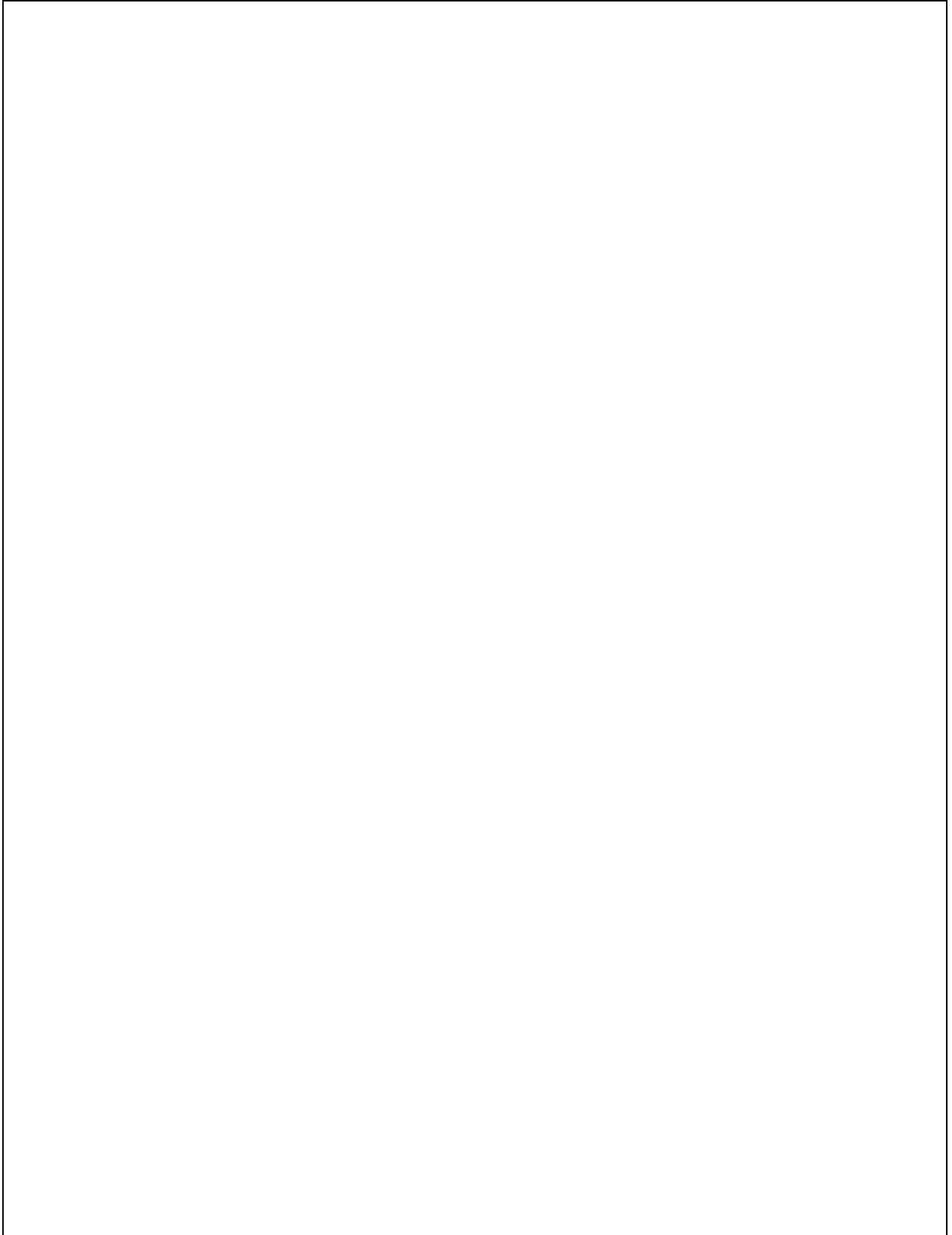
Eine Verlegung der Transportleitung entlang dem Hornbach war leider nicht möglich, weil gemäss Herr Göldi von der Abteilung Wasserbau des AWEL Längsleitungen in öffentlichen Gewässern nicht erlaubt sind und der Hornbach zudem ein Kandidat für eine Neugestaltung ist. Es musste deshalb auf eine etwas kostspieligere Lösung ausgewichen werden.

Die Transportleitung zwischen Fassung und Verbraucher führt gemäss Vorschlag in Figur 4.8 zu einem grossen Teil durch Wiesenland und Garten und ist damit unproblematisch. Etwas komplizierter ist die Durchquerung der Bellerivestrasse und des Hornbaches, was nicht im offenen Graben sondern im Pressvortrieb gelöst werden kann. Vorteilhaft sind auch die Besitzverhältnisse, indem die Leitung mit kleinen Ausnahmen im öffentlichen Grund verläuft und deshalb keine Probleme bezüglich Durchleitungsrechten zu erwarten sind.

Neben dem Pressvortrieb durch die Bellerivestrasse wäre es auch denkbar, das Thermalwasser in einer Leitung entlang der Unterquerung zu den Verbrauchern jenseits der Bellerivestrasse zu führen. Diese Lösung ist aber gemäss Angaben der Bauunternehmung vermutlich teurer als der Pressvortrieb.

Das warme Thermalwasser muss mit grosser Wahrscheinlichkeit im Zweirohrsystem zu den Verbrauchern und von dort wieder zurück zur Fassung transportiert werden. Eine Lösung im Einrohrsystem ist aus den in 4.42 genannten Gründen vermutlich nicht machbar. Beide Leitungen können aber problemlos im selben Graben verlegt werden, so dass sich nur unwesentlich höhere Mehrkosten ergeben. Von der Fassung kann das abgekühlte Wasser dann in der bestehenden Leitung in den Ententeich und von dort in den See entsorgt werden.

Es ist vorgesehen, in gewissen Abständen in der Transportleitung Kontrollschächte einzubauen, um die Leitungen von eventuellen Kalkausscheidungen reinigen zu können. Total sind vermutlich etwa 2 bis 3 solche Schächte verteilt über die Leitungslänge notwendig.



**Figur 4.8: Situationsplan mit Leitungsführung der Wärmegewinnungsleitung
(Masstab 1:2500)**

4.6. Dimensionierung der Transportleitung

Als Leitungsart für die Transportleitung ist ein unisoliertes HDPE-Doppelrohr (Gerodur Benken) vorgesehen, dessen äussere Hülle als mechanischer Schutz dient und in dessen innerer Hülle das Thermalwasser fliesst. Zwischen Innen- und Aussenrohr, welche durch Gleitkufen in gewissen Abständen miteinander verbunden sind, befindet sich Luft. Diese wirkt als Isolator, so dass keine grossen Temperaturverluste zwischen dem Ort der Fassung und den Verbrauchern zu erwarten sind.

Detaillierte Simulationsrechnungen haben ergeben, dass die Abkühlung des Wassers zu Beginn der Nutzung mit einem unisolierten Rohr relativ stark ist, weil der Boden in 1.2 m Verlegetiefe anfänglich noch kalt ist und so ein grösserer Wärmestrom vom Rohr zum Boden stattfindet. Schon nach kurzer Zeit heizt sich das umgebende Erdreich aber auf und die Wärmeverluste werden immer kleiner.

In den folgenden Figuren 4.10-4.12 wird gezeigt, welche Abkühlungen in den 3 Ausbauetappen in Abhängigkeit der Zeit etwa erwartet werden können.

Für die verschiedenen Ausbauetappen wurden dabei durchschnittliche jährliche Fördermengen verwendet, wie sie in Figur 4.9 dargestellt sind.

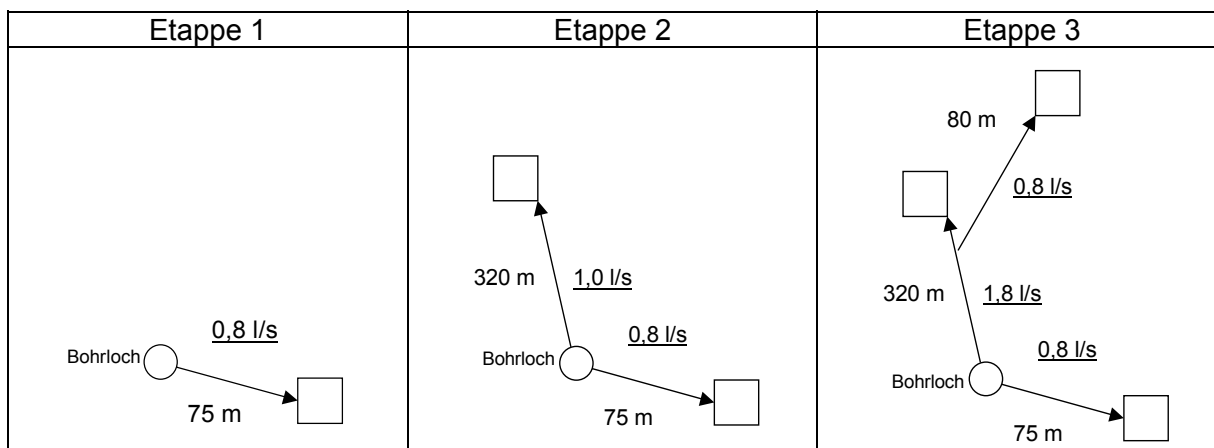


Fig 4.9: Untersuchte Ausbauetappen mit den entsprechenden Fliesstrecken und Durchflussraten

Als weitere Parameter wurden nachstehende Werte verwendet:

Wassertemperatur bei Rohreintritt	=	26°C
Umgebungstemperatur Erdreich	=	10°C
Rohrradius	=	0,045 m
spez. Wärmekapazität der Umgebung	=	$2 \cdot 10^6 \text{ J/K/m}^3$
Wärmeleitfähigkeit der Umgebung	=	0,5 / 2 W/mK
Durchflussraten	=	0,8 / 1,0 / 1,8 l/s

Für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches bez. der Umgebung wurden zwei unterschiedliche Werte (0.5 bez. 2 W/mK) berücksichtigt.

Der Wärmeverlust des Thermalwassers auf dem Weg von der Förderung zu den Endverbrauchern ist ein instationärer Prozess und nimmt mit zunehmender Betriebsdauer ab (vgl. Figuren 4.11-4.13). Dabei sind die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ($\lambda_{\text{Umgeb}} = 2 \text{ W/m K}$)

sowie diejenige der Rohrleitungen ($\lambda_{PVC} = 0,15 \text{ W/m K}$, $\lambda_{PEHD} = 0,4 \text{ W/m K}$) wesentliche Parameter. Da in der Formel für die instationäre Abkühlung lediglich die Wärmeleitfähigkeit λ_{Umgeb} des Untergrundes miteinfliesst, gilt diese Formel streng genommen nur für Rohrmaterialien mit einer Wärmeleitfähigkeit, die grösser als diejenige des Untergrundes ist. Da doppelwandige Kunststoffrohre (PEHD) vorgesehen sind ($\lambda_{PEHD} < 0,4 \text{ W/m K}$), wird deren Isolationseffekt auf die Wassertemperatur durch eine Korrektur von λ_{Umgeb} auf $0,5 \text{ W/m K}$ abgeschätzt. Die in den nachstehenden Figuren dargestellten Temperaturprofile sind daher für beide Werte berechnet.

Aus den Figuren.4.10-4.12 lassen sich für die 3 Ausbautetappen folgende maximalen Wasserabkühlung ablesen.

	Etappe 1		Etappe 2		Etappe 3	
λ_{Umgeb}	0,5	2	0,5	2	0,5	2
ΔT	-0,3 K	-0,8 K	-0,8 K	-2,5 K	-0,8 K	-2,5 K

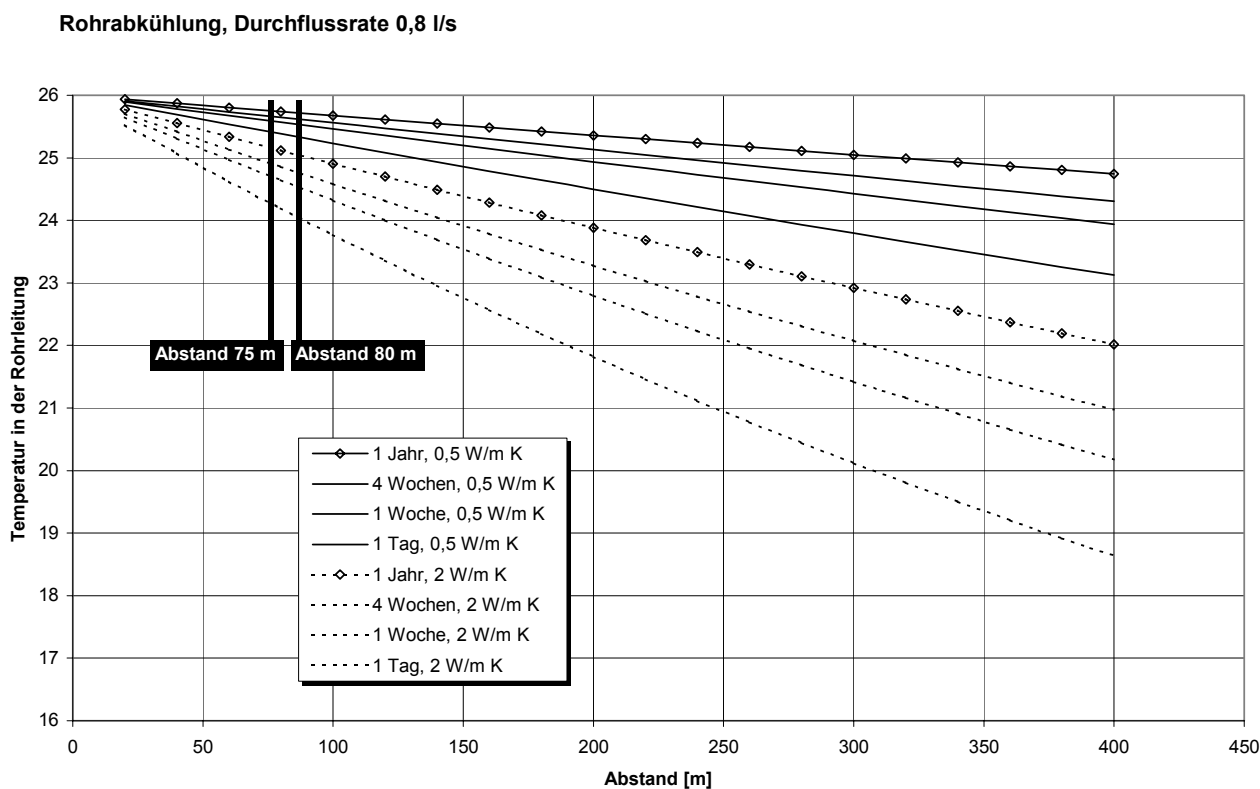


Fig 4.10: Temperaturentwicklung in der Rohrleitung bei einer Durchflussrate von 0,8 l/s

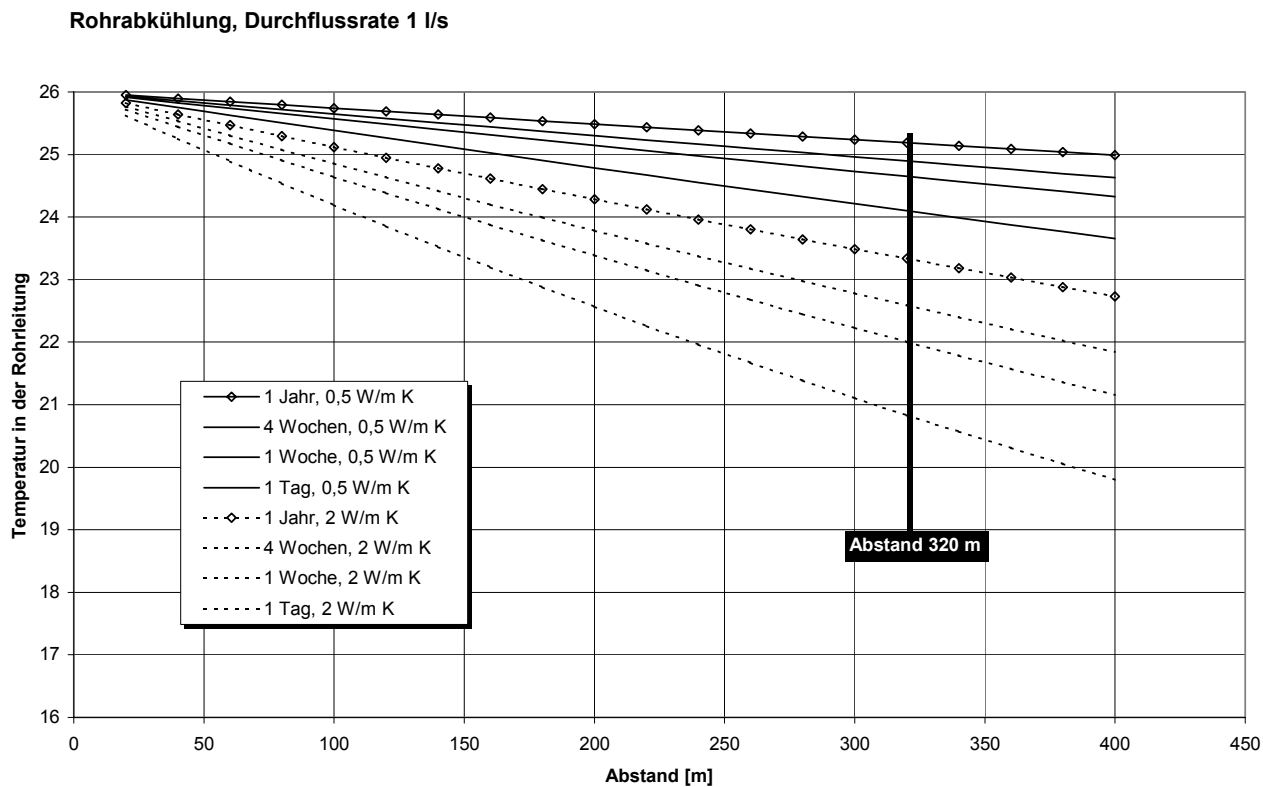


Fig 4.11: Temperaturentwicklung in der Rohrleitung bei einer Durchflussrate von 1,0 l/s

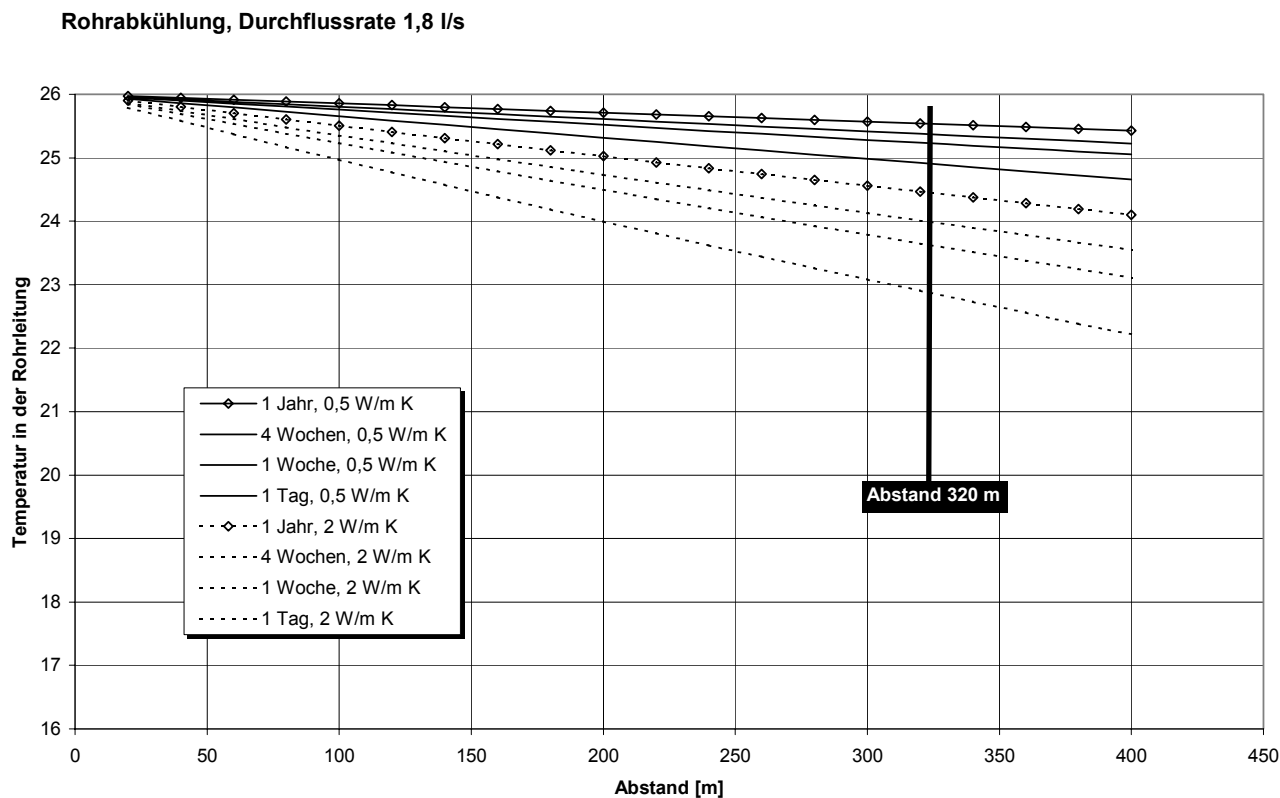


Fig 4.12: Temperaturentwicklung in der Rohrleitung bei einer Durchflussrate von 1,8 l/s

Die Berechnungen zeigen, dass der Temperaturverlust unter Annahme einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffrohrs und des umgebenden Erdreichs von 0.5 W/mK in allen Ausbautappen nach einem Jahr bei ca. 1K liegt. Im Fall einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von 2 W/mK, erhöht sich der entsprechende Verlust auf etwa 2,5 K. Die Wassertemperatur von 24°C kann damit bei den Verbrauchern gewährleistet werden.

Dass der Temperaturverlust in der Transportleitung nicht allzu gross sein kann, zeigt auch eine Abschätzung des Wärmewiderstandes des Gerodur Doppewandrohrs. Dieses weist dank des mit Luft gefüllten Hohlraumes einen k-Wert von etwa 6 W/m²K auf. Im Vergleich zu einem isolierten Rohr (z.B. Calpex mit k=0.42 W/m²K) ist dieser Wert zwar schlechter, er ist aber für das kalte Fernwärmenetz völlig ausreichend. Die Temperaturverluste sind im stationären Fall für alle Ausbautappen kleiner als 1°C. Eine Ausführung als isoliertes Fernwärmerohr mit z.B. 4 cm Wärmedämmung wäre zwar hinsichtlich Temperaturverlusten besser, belastet die Wirtschaftlichkeit aber auf Grund der Erfahrung relativ ungünstig

Es ist vorgesehen, nur den Vorlauf als Doppelwandrohr nach System Gerodur auszuführen. Der Rücklauf braucht keine Isolation und kann daher ohne Aussenrohr verlegt werden.

Der zu wählende Rohrdurchmesser hängt ein wenig davon ab, welche und wieviel Wärmebezüger mit Thermalwasser versorgt werden sollen. Da der Durchmesser des vorgesehenen Kunststoffrohres keinen allzu grossen Einfluss auf die Kosten der Wärmegewinnung hat (Rohrkosten sind gering im Vergleich zu den Tiefbaukosten), wird empfohlen, den Durchmesser eher etwas grosszügig zu wählen. Dadurch können die Druckverluste in der Transportleitung und damit auch die Pumpenergiekosten geringer gehalten werden. Im Fall, dass nur das Casino Zürichhorn und die Alterssiedlung versorgt werden, genügt ein Doppelrohr Durchmesser 125/75. Falls die Leitung bis zur Baurstrasse geführt wird, ist es sinnvoll, den Durchmesser von der Fassung bis zur Alterssiedlung auf 160/90 zu erhöhen. In einer weiteren Bearbeitungsstufe muss dann nochmals überprüft werden, bei welchem Druckverlust (50-150 Pa/m) ein Kostenoptimum entsteht.

Es wird vorgeschlagen, die Leitungswiderstände der Transportleitung inklusive der Druckverluste über die Wärmetauscher nicht mit einer separaten Umwälzpumpe zu decken, sondern direkt mit der Pumpe im Brunnen. Die Unterwasserpumpe muss dafür aber für die um diesen Betrag (ungefähr 10-15 m) grössere Förderhöhe ausgelegt werden.

5. Wärmeerzeugung

5.1. Technisches Konzept

Das technische Konzept für die Wärmeerzeugung sieht vor, das warme Thermalwasser als Wärmequelle für eine Elektrowärmepumpe zu nutzen. Zusätzlich zur Wärmepumpe ist auch ein Spitzenkessel vorgesehen, der die Wärmepumpe bei tiefen Aussentemperaturen unterstützt. Die Wärmepumpe wird so ausgelegt, dass sie 50 % des maximalen Wärmeleistungsbedarfs decken kann. Bei bivalent parallelem Betrieb kann von der Wärmepumpe damit etwa 85 bis 90 % des gesamten Energiebedarfs gedeckt werden.

Theoretisch, d.h. von der Kapazität der Thermalbohrung her, könnte das Casino Zürichhorn und auch die Alterssiedlung (die Baurstrasse allerdings nicht mehr) allein mit der Wärmepumpe geheizt werden. Ein monovalenter Betrieb ist aber vor allem von der Betriebssicherheit her jedoch nicht sinnvoll. Ausserdem hat der bivalente Betrieb den Vorteil, dass mit dem Spitzenkessel nicht nur der Restwärmebedarf abgedeckt, sondern auch die Vorlauftemperatur bei tiefen Aussentemperaturen angehoben und damit die Arbeitszahl der Wärmepumpe verbessert werden kann.

Grundsätzlich wird vorgeschlagen, in jedem zu versorgenden Gebäude (Casino, Alterssiedlung, Baurstrasse) eine separate Wärmepumpe aufzustellen. Das Thermalwasser kann damit als kalte Fernwärme transportiert und dort mittels der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau veredelt werden. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollte trotzdem noch abgeklärt werden, ob eine warme Fernwärmeverteilung dem Kunden eventuell einen grösseren Nutzen bringen könnte.

Von den Platzverhältnissen her ist es möglich, sowohl im Casino Zürichhorn als auch in der Alterssiedlung eine Wärmepumpe und einen Spitzenkessel aufzustellen. Beim Casino muss die ganze Wärmeerzeugung aus Altersgründen sowieso neu gemacht werden und in der Alterssiedlung kann einer der beiden bereits bestehenden Heizkessel aus dem Jahre 1993 neu als Spitzenkessel weiter verwendet werden.

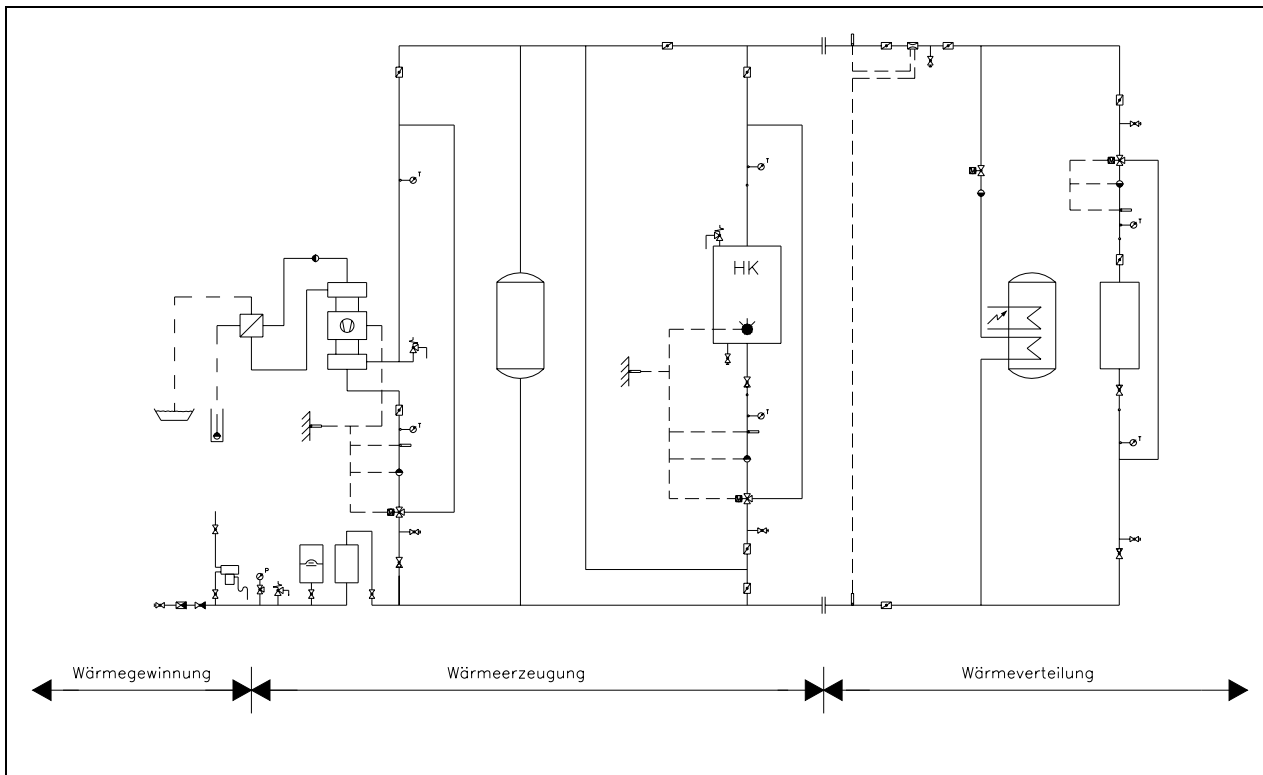
In der Baurstrasse wurden die Platzverhältnisse und auch die Wärmeversorgung nicht näher untersucht. Es ist lediglich bekannt, dass in den 5 Liegenschaften Nr. 30 bis 38 vor 10 Jahren neue Heizkessel installiert wurden. Weil diese Liegenschaften der selben Verwaltung angehören, wurde angenommen, dass in einer der 5 Liegenschaften der Heizkessel durch eine Wärmepumpe ersetzt werden kann, die dann alle Gebäude mit Grundlastwärme versorgt.

Für sämtliche Gebäude sieht das technische Konzept vor, das Thermalwasser über einen Wärmetauscher von 24 °C auf 9 °C abzukühlen. In einem weiteren Schritt wird diese Wärme dann über einen Glykolkreislauf auf den Verdampfer der Wärmepumpe übertragen, von wo dann mit Hilfe der Elektrowärmepumpe max. 60 grädiges Vorlaufwasser produziert wird.

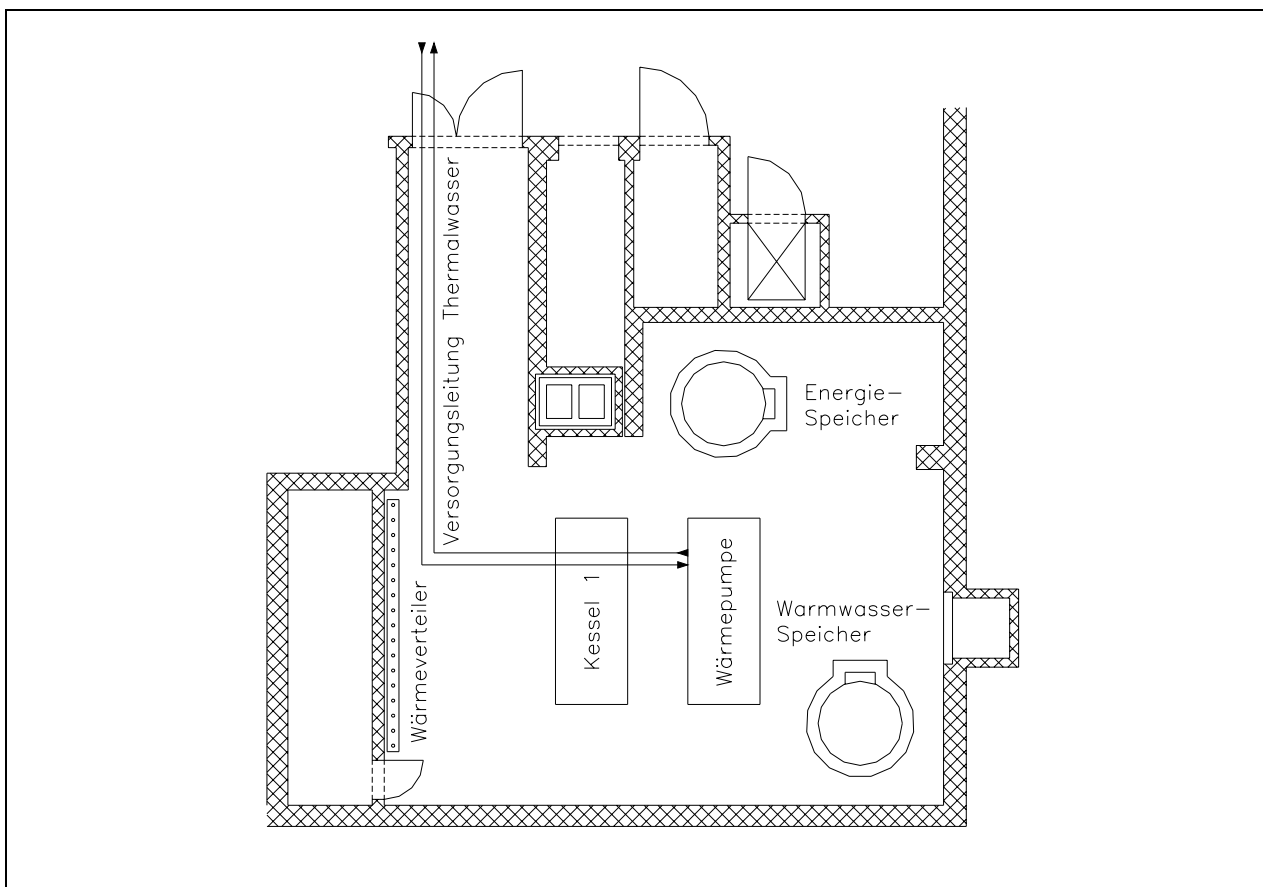
Die Wärmepumpe wird nicht nur zur Deckung des Heizenergiebedarfs, sondern ebenso auch für die Bereitstellung des Warmwassers eingesetzt. Sie wird dabei so geregelt, dass sie energetisch möglichst optimal betrieben wird d.h. das Temperaturniveau wird über Stufenschaltungen immer nur soweit angehoben, dass die jeweiligen Bedürfnisse (Heizung, Warmwasser) befriedigt werden können.

Die folgenden Figuren 5.1 bis 5.4 zeigen vom Prinzip und vom Platz her wie die Wärmeerzeugung im Casino Zürichhorn und in der Alterssiedlung technisch gelöst werden kann. Weitere Unterlagen über die bestehende Heizung befinden sich im Anhang 5 und 6.

5.11 Casino Zürichhorn

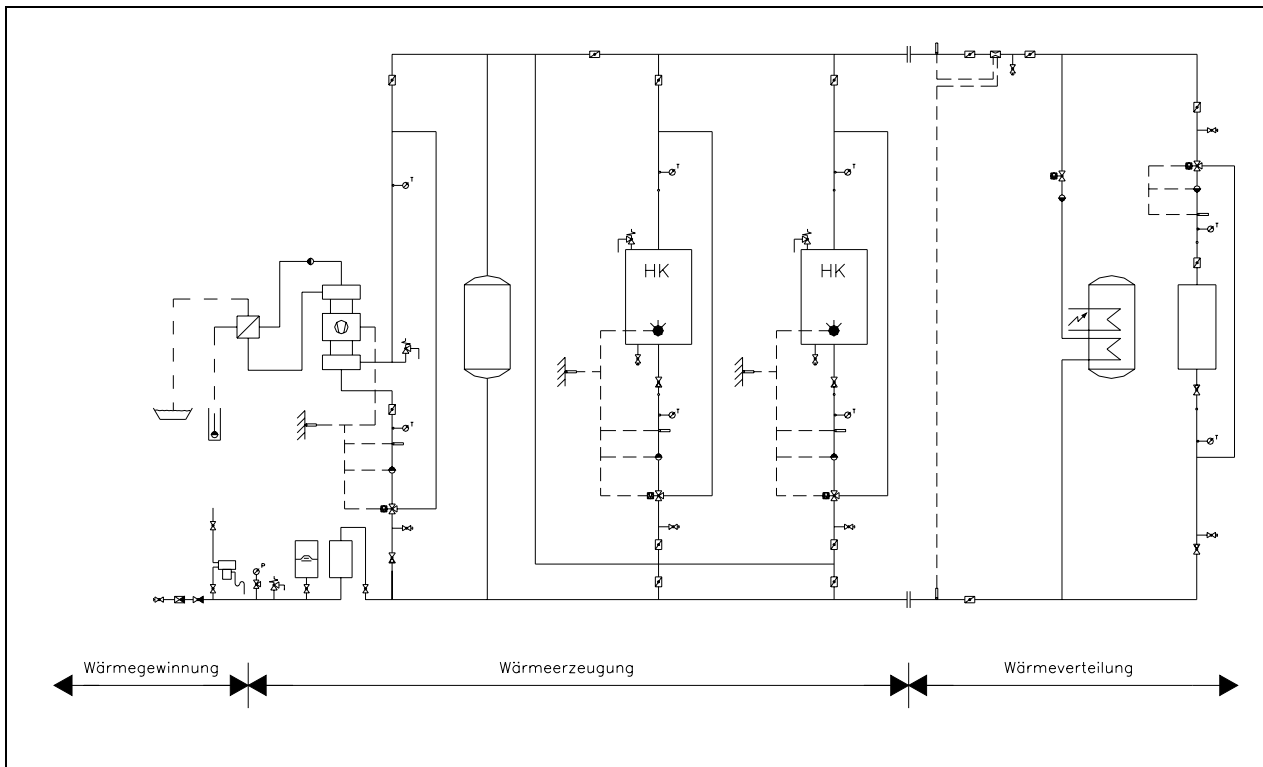


Figur 5.1: **Prinzipschema der Wärmeerzeugungsanlage für Casino Zürichhorn**

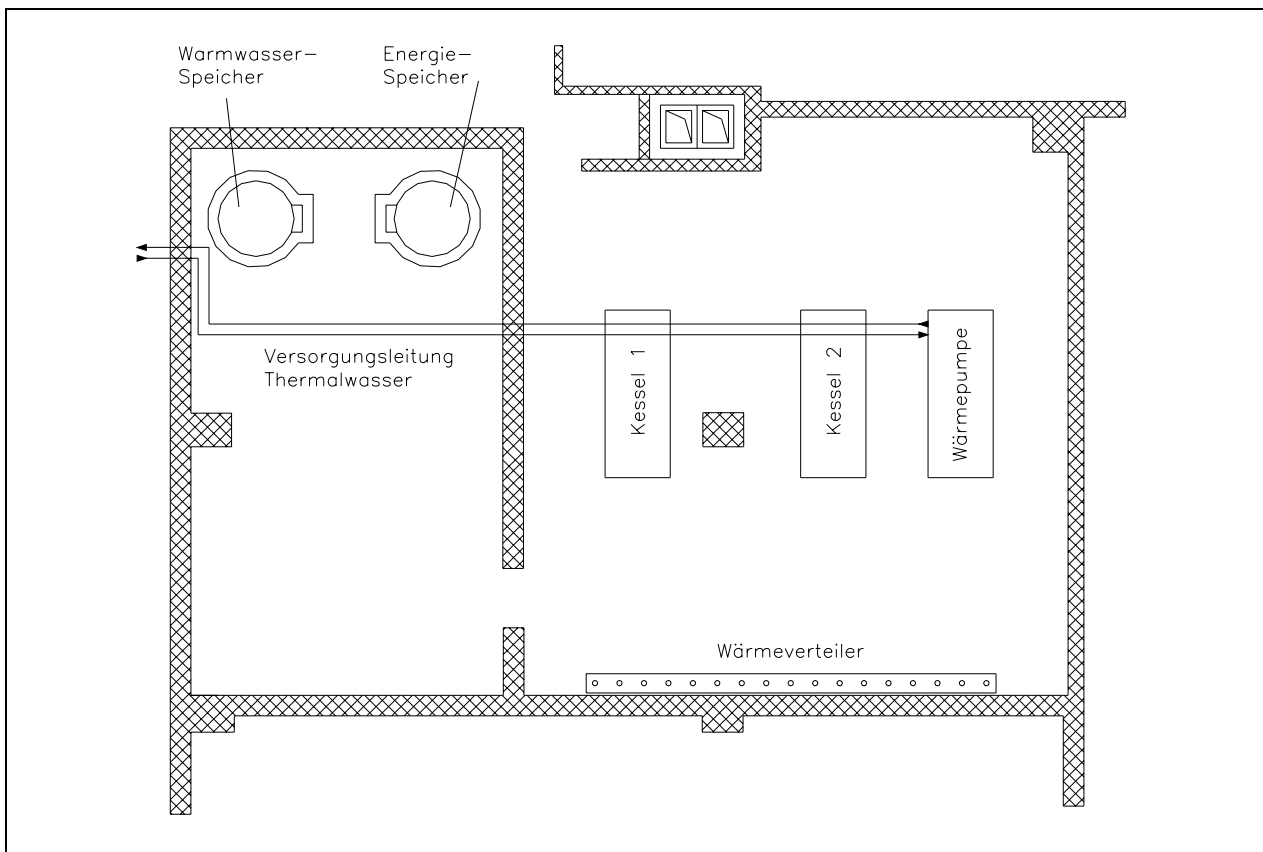


Figur 5.2: **Aufstellungsskizze der technischen Anlagen für Casino Zürichhorn**

5.12 Alterssiedlung Riesbach



Figur 5.3: Prinzipschema der Wärmeerzeugungsanlage für Alterssiedlung Riesbach



Figur 5.4: Aufstellungsskizze der technischen Anlagen für Alterssiedlung Riesbach

5.2 Optimierung der Wärmepumpenanlage

5.21 Fördermenge resp. Abkühlung des Thermalwassers

Für die Deckung eines bestimmten Heizwärmebedarfs muss dem Thermalwasser eine bestimmte Leistung entzogen werden. Diese ist proportional dem Produkt aus Fördermenge und Abkühlung. Ob relativ viel Thermalwasser bei kleiner Abkühlung oder wenig Wasser mit grosser Abkühlung entnommen wird, hat auf die Entzugsleistung (Verdampferleistung der Wärmepumpe) keinen Einfluss.

Hingegen wird für eine bestimmte Entzugsleistung je nach Fördermenge die Verdampfungstemperatur und damit die Leistungsziffer der Wärmepumpe beeinflusst. Grosse Fördermengen erlauben wegen der geringeren Abkühlung höhere Verdampfungstemperaturen und damit bessere Leistungsziffern. Umgekehrt haben kleine Fördermengen einen positiven Einfluss auf den Leistungsbedarf der Förderpumpe. Da schlussendlich sowohl der Energieverbrauch des Kompressors als auch der Hilfsbetriebe von Bedeutung sind, ist es sinnvoll, diese Abhängigkeiten etwas näher anzuschauen.

Von der Firma CTA AG in Zürich wurde die Leistungsziffer für eine Wärmepumpe mit etwa 150 kW Heizleistung für verschiedene Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen durchgerechnet. Es hat sich dabei gezeigt, dass Leistungsziffern von etwa 55 % des Carnot Wirkungsgrades erreicht werden können.

In Tabelle 5.1 ist dargestellt, wie die Leistungsziffer mit und ohne Hilfsenergie für verschiedene Abkühlungen des Thermalwassers bei einer Kondensatorleistung von 150 kW beeinflusst wird. Die Kondensationstemperatur wird dabei als konstant 60 °C und die Eintrittstemperatur in den Verdampfer als konstant 24 °C angenommen.

Verdampf. Temp.	Austritts-temp. Verdampf	Abkühl. Thermal-Wasser	Leistungs-ziffer Kompr.	Verdampfer-leistung	Thermal-Wasser-menge	Förder-höhe Pumpe	Pump-Leist.	Kompr. Leist.	Kompr. und Pumpen-leistung	Leistungs-ziffer Kompr. und Pumpe
°C	°C	C	-	kW	lit/s	m	kW	KW	kW	-
4	9	15	3.27	104.1	1.66	105	4.8	45.9	50.7	2.96
9	14	10	3.59	108.2	2.59	140	7.8	41.8	49.6	3.02
15	20	4	4.07	113.1	6.77	305	33.8	36.9	70.7	2.12

Tabelle 5.1 Einfluss der Abkühlung des Thermalwassers auf die Leistungsziffer der Wärmepumpe (mit und ohne Hilfsbetriebe)

Die Zusammenstellung zeigt, dass kleine Abkühlungen (4 °C) für die Wärmepumpe allein sehr vorteilhaft sind, über alles betrachtet inklusive Hilfsbetriebe aber zu sehr ungünstigen Leistungsziffern führen. Grössere Abkühlungen von 10 bis 15 °C schneiden dagegen in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch (Kompressor + Umwälzpumpe) bedeutend besser ab. Es empfiehlt sich daher die geförderte Wassermenge pro Verbraucher eher klein zu halten.

5.22 Kondensationstemperatur der Wärmepumpe

Tiefe Kondensationstemperaturen haben einen positiven Einfluss auf die Leistungsziffer der Wärmepumpe und sollten deshalb angestrebt werden. Wie stark der Einfluss ist, wird in Figur 5.2 für den Fall einer Abkühlung des Thermalwassers von 15 °C, d.h. eine Verdampfungstemperatur von 4 °C gezeigt.

Verdampfungstemperatur °C	Kondensationstemperatur °C	Leistungsziffer Kompressor °C
4	60	3.27
4	65	3.05
4	70	2.86

Tabelle 5.2 Einfluss der Kondensationstemperatur auf die Leistungsziffer einer Wärmepumpe

Gemäss den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Abklärungen liegen die maximal benötigten Vorlauftemperaturen sowohl beim Casino Zürichhorn als auch bei der Alterssiedlung Dufourstrasse 146 bei etwa 60 °C. Da die Wärmeezeugung bivalent ausgelegt wird, kann bei tiefen Aussentemperaturen, wenn die Wärmepumpe den Wärmebedarf nicht mehr allein decken kann, der Spitzenkessel nicht nur den Restwärmebedarf decken, sondern auch ein Teil der Aufheizung des Rücklaufes übernehmen.

Bei einer Rücklauftemperatur von 50 °C im Auslegungsfalle, erwärmt die Wärmepumpe das Wasser von 50 °C auf 55 °C und der Spitzenkessel auf die benötigten 60 °C. Mit einer Temperatur von 55 °C kann auch das Warmwasser im Sommer bereit gestellt werden, so dass eine max. Kondensationstemperatur von 60 °C für die Wärmeversorgung des Casinos als auch der Alterssiedlung ausreichend sein dürfte. Bei kleinerem Wärmebedarf kann selbstverständlich die Kondensationstemperatur gesenkt und die Temperatur gleitend dem Bedarf angepasst werden.

5.23 Regelung der Förderpumpe

Der Leistungsbedarf der Unterwasserpumpe im Thermalbrunnen ist stark von der Fördermenge resp. der dafür notwendigen Absenkung des Grundwasserspiegels abhängig. Mit zunehmender Förderung von Thermalwassers nimmt die Leistung etwa quadratisch und der Energiebedarf direkt proportional zur Laufzeit der Förderpumpe zu.

Energetisch am ungünstigsten ist der Fall eines durchgehenden Betriebes der Förderpumpe. Ein solcher Dauerbetrieb (8760 h/Jahr) könnte notwendig sein wegen der Gefahr einer Verstopfung des Brunnens infolge Ein- und Ausschalten der Pumpe. Zur Zeit ist unbekannt, ob bei einem solchen intermittierenden Betrieb Schwemmstoffe aus dem Boden in die Pumpe gelangen könnten.

Falls die Förderpumpe nur in Betrieb sein muss, wenn die Wärmepumpe läuft, d.h. wenn ein Wärmebedarf vorhanden ist, so kann die Laufzeit von 8760 h auf mehr als die Hälfte (3900 h) reduziert werden.

Noch mehr Energie kann gespart werden, wenn die Fördermenge der Unterwasserpumpe durch Drehzahlregelung dem Bedarf angepasst wird. Im Vergleich zur unregulierten Pumpe kann dadurch noch etwa 20 % Energie gespart werden.

In Tabelle 5.3 ist dargestellt, wie hoch die möglichen Einsparungen abhängig von Betriebsart und Ausbautappen für einen Strompreis von 12.5 Rp./kWh (Mittelwert EWZ Tarif) und eine Strompreisteuerung von 8 % über 15 Jahre (Mittelwertfaktor 1.08) sind.

	Leistung Unterwasser- pumpe kW	Energie verbrauch Unter- wasserpumpe kWh	Energie kosten Unter- wasserpumpe Fr./a	Energie verbrauch Unter- wasserpumpe kWh	Energie kosten Unter- wasserpumpe Fr./a	Investition für Dreh- zahlregel. Fr.	Kapital- dienst für Drehzahl- regelung Fr./a
Etappe 1		Laufzeit 8760 h/a		Laufzeit 3900 h/a			
Betriebsart 1 ohne Regelung	5	43800	5913	19500	2632		
Betriebsart 1 mit Regelung	5	35040	4730	15600	2106		
Einsparung durch Dreh- zahlregelung	5	8760	1183	3900	526	10'000	810
Etappe 2		Laufzeit 8760 h/a		Laufzeit 3900 h/a			
Betriebsart 1 ohne Regelung	13.5	118260	15965	52650	7107		
Betriebsart 1 mit Regelung	13.5	94608	12772	42120	5686		
Einsparung durch Dreh- zahlregelung	13.5	23652	3193	10530	1421	21'000	1701
Etappe 3		Laufzeit 8760 h/a		Laufzeit 3900 h/a			
Betriebsart 1 ohne Regelung	26	227760	30747	101400	13689		
Betriebsart 1 mit Regelung	26	182208	24598	81120	10951		
Einsparung durch Dreh- zahlregelung	26	45552	6149	20280	2737	25'000	2025

Tabelle 5.3 Kosten und Energieeinsparung bei Drehzahlregelung

Die Zusammenstellung zeigt, dass sich eine Drehzahlregelung für alle 3 Ausbautappen lohnt, falls die Unterwasserpumpe 24 h pro Tag betrieben werden muss. Die Einsparungen nehmen dabei mit zunehmendem Ausbaugrad zu und erreichen das Maximum im Vollausbau.

Für den Fall, dass die Umwälzpumpe nur bei Wärmebedarf (3900 h/Jahr) in Betrieb sein muss, lohnt sich eine Drehzahlregelung dagegen nur im Vollausbau (Anschluss von Casino, Alterssiedlung und Baurstrasse). Bei kleinem Energiebedarf sind die Kosten der Drehzahlregelung höher als die möglichen Einsparungen.

5.3.Auslegung

In Tabelle 5.4 sind die wichtigsten energetischen Daten der Wärmequelle sowie der Wärmeverbraucher in den 3 Ausbaustufen zusammengestellt.

Wärmequelle					
max. Thermalwassermenge	lit./s				8
Temperatur Bohrlochkopf	°C				26
Temperatur Verbraucher	°C				24
min. Rückgabetemperatur	°C				4
max. Entzugsleistung	kW				668
Versorgte Gebäude		Casino	Casino Altersh.	Casino Altersh. Bauerst	Total
1. Etappe (Minivariante)					
Wärmeleistungsbedarf	kW	300.0			300.0
Heizleistung Wärmepumpe	kW	150.0			150.0
Entzugsleistung Thermalwasser	kW	107.1			107.1
Thermalwassermenge bei Abkühlung auf 9 °C	lit./s	1.7			1.7
2. Etappe (Midivariante)					
Wärmeleistungsbedarf	kW	300.0	400.0		700.0
Heizleistung Wärmepumpe	kW	150.0	200.0		350.0
Entzugsleistung Thermalwasser	kW	107.1	142.9		250.0
Thermalwassermenge bei Abkühlung auf 9 °C	lit./s	1.7	2.3		4.0
Vollausbau (Maxivariante)					
Wärmeleistungsbedarf	kW	300.0	400.0	330.0	1030.0
Heizleistung Wärmepumpe	kW	150.0	200.0	165.0	515.0
Entzugsleistung Thermalwasser	kW	107.1	142.9	117.9	367.9
Thermalwassermenge bei Abkühlung auf 9 °C	lit./s	1.7	2.3	1.9	5.9

Tabelle 5.4: Verfügbares und nutzbares Wärmepotential

Die Tabelle 5.4 zeigt, dass unter Annahme einer Abkühlung des Thermalwassers auf dem Weg von der Fassung bis zu den Verbrauchern von 26 °C auf 24 °C und unter Annahme einer

weiteren Abkühlung auf 4 °C durch den Wärmeentzug in der Wärmepumpe dem Thermalwasser eine Leistung von 670 kW entzogen werden kann. Dies ist die maximale mögliche Wärmequellenleistung des Thermalbohrung Tiefenbrunnen.

Aus zwei Gründen ist es jedoch nicht sinnvoll, die Entzugsleistung so hoch zu wählen. Durch die max. Abkühlung des Thermalwasser auf 4 °C wird die Leistungsziffer der Wärmepumpe negativ beeinflusst und der Hilfsenergieverbrauch der Förderpumpe steigt bei einer maximal möglichen Fördermenge von 8 lit./s viel zu stark an.

Für die Auslegung wird die maximale Entzugswassermenge im Vollausbau (Casino, Alterssiedlung und Baurstrasse) deshalb auf 5.9 lit./s begrenzt und das Thermalwassers nur auf 9°C statt auf die max. möglichen 4 °C abgekühlt. Der Thermalbrunnen weist damit leistungsmässig noch eine gewisse Reserve auf.

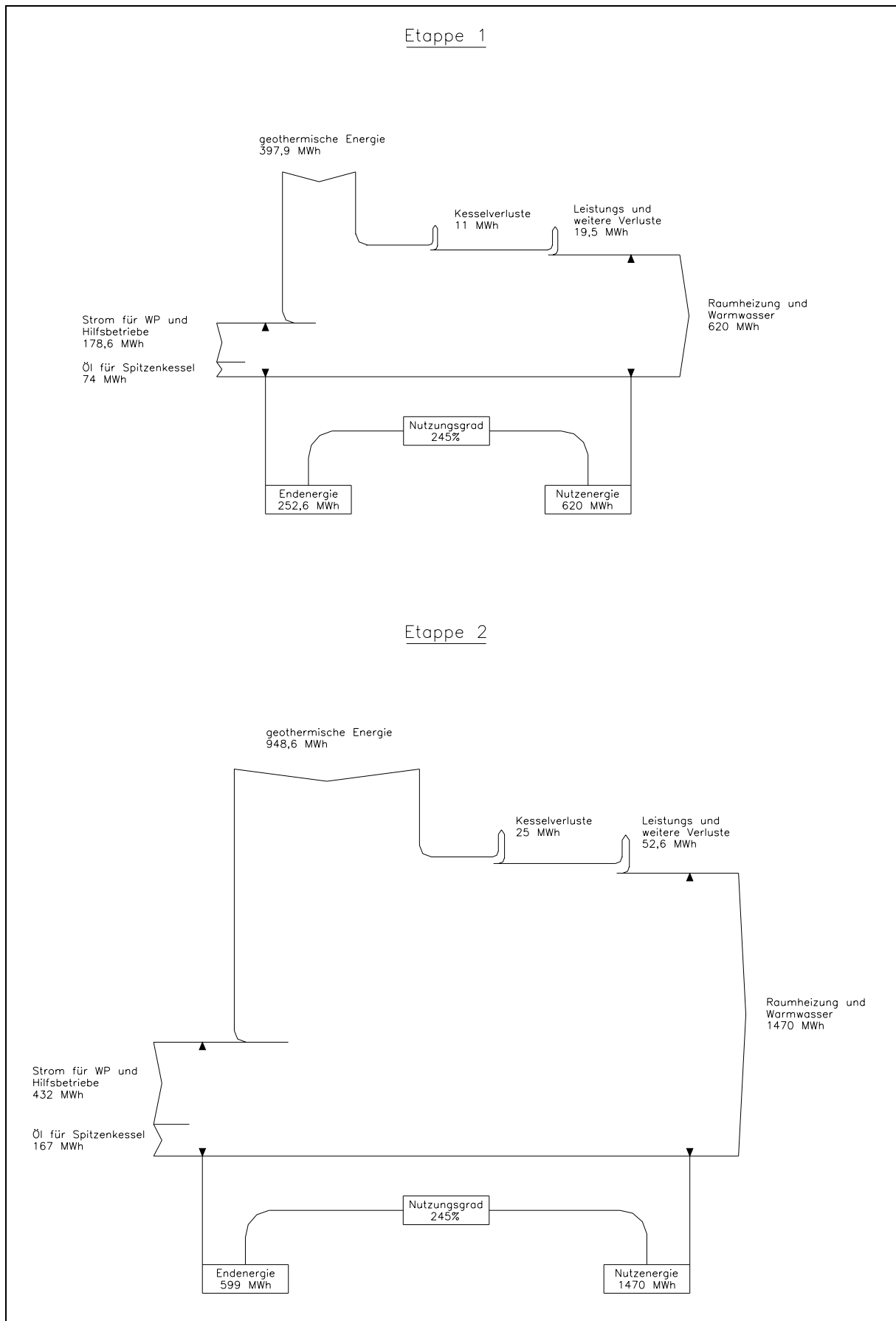
Vom verfügbaren Wärmepotential wird in der 1. Etappe 1.7 lit./s, in der zweiten Etappe 4 lit./s und in der 3. Etappe 5.9 lit./s genutzt. Mit dieser max. Thermalwassermenge lässt sich im Vollausbau ein Wärmeleistungsbedarf von über 1 MW decken. Davon wird 515 kW d.h. 50 % von der Wärmepumpe und gleich viel vom Spitzenkessel erbracht.

Die Tabelle 5.5 zeigt die Leistungen und Energien die von Wärmepumpe und Spitzenkessel in den verschiedenen Ausbaustufen zur Deckung des Heizenergiebedarfs in Form kostenpflichtiger Energie (Strom, Öl) bereit gestellt werden müssen.

Zusätzlich ist in Figur 5.5 das entsprechende Energieflussdiagramm für die erste und zweite Ausbaustufe dargestellt. Es zeigt, dass mit der Nutzung des Thermalwassers der Energiebedarf für Raumheizung und Warmwasser mit einem recht hohen Nutzungsgrad von 245 % bereit gestellt werden kann. Im Vergleich zu einer Ölheizung (Jahreswirkungsgrad von 85 %) entspricht dies einer markanten Verbesserung.

		Casino	Altersh.	Bauerst	Total
1. Etappe					
Heizleistung Wärmepumpe	kW	150.0			150.0
Verdampferleistung Wärmepumpe	kW	107.1			100.0
Kompressorleistung Wärmepumpe	kW	50.0			42.9
Kondensatorenergie Wärmepumpe	MWh/a	557.0			557.0
Verdampferenergie Wärmepumpe	MWh/a	397.9			397.9
Kompressorenergie Wärmepumpe	MWh/a	159.1			159.1
Nutzenergie Kessel	MWh/a	63.0			63.0
Endenergie Kessel	MWh/a	74.0			74.0
2. Etappe					
Heizleistung Wärmepumpe	kW	150.0	200.0		350.0
Verdampferleistung Wärmepumpe	kW	107.1	142.9		250.0
Kompressorleistung Wärmepumpe	kW	42.9	57.1		100.0
Kondensatorenergie Wärmepumpe	MWh/a	557.0	771.0		1328.0
Verdampferenergie Wärmepumpe	MWh/a	397.9	550.7		948.6
Kompressorenergie Wärmepumpe	MWh/a	159.1	220.3		379.4
Nutzenergie Kessel	MWh/a	63.0	79.0		142.0
Endenergie Kessel	MWh/a	74.0	93.0		167.0
Vollausbau					
Heizleistung Wärmepumpe	kW	150.0	200.0	165.0	515.0
Verdampferleistung Wärmepumpe	kW	107.1	142.9	117.9	367.9
Kompressorleistung Wärmepumpe	kW	42.9	57.1	47.1	147.1
Kondensatorenergie Wärmepumpe	MWh/a	557.0	771	611	1939.0
Verdampferenergie Wärmepumpe	MWh/a	397.9	550.7	436.4	1385.0
Kompressorenergie Wärmepumpe	MWh/a	159.1	220.3	174.6	554.0
Nutzenergie Kessel	MWh/a	63.0	79.0	69.0	211.0
Endenergie Kessel	MWh/a	74.0	93.0	81.0	248.0
Annahmen für Arbeitszahl der Wärmepumpe ohne Hilfsbetriebe		3.5	3.5	3.5	

Tabelle 5.5:Leistungs- und Energiedaten der Wärmeezeugungsanlage



Figur 5.5 Energieflussdiagramm für die 1. und 2. Ausbautetappe

6. Kosten und Wirtschaftlichkeit

6.1. Investitionen

In den folgenden Tabellen sind die Investitionen zusammengestellt, die in den verschiedenen Ausbaustufen der Thermalwassernutzung notwendig sind. Tabelle 6.1 enthält die Kosten für die Variante Einrohrsystem mit Einleitung in die Kanalisation, während Tabelle 6.2 gültig ist für die Variante Zweirohrsystem mit Rückführung des Thermalwassers zum Ort der Fassung und Weiterleitung in den See.

Für die Kostenschätzung wurden sowohl für die Wärmegewinnung als auch Wärmeerzeugung für die wichtigen Anlagenteile Richtofferten bei Unternehmern eingeholt. So wurden die Kosten für die Kunststoff Transportleitung bei der Firma Gerodur in Benken angefragt. Für den Tiefbau d.h. das Verlegen der Leitungen wurden die Kosten vom Baugeschäft A. Dietrich in Zürich eingeholt. Dieses Unternehmen lieferte detaillierte Angaben nicht nur zu den Kosten im offenen Graben, sondern auch zum Pressvortrieb (Bellerivestrasse). Bei der Wärmeerzeugung wurden nur die Preise für die Wärmepumpe angefragt (CTA in Zürich), während die anderen Kosten auf Grund der Erfahrung geschätzt wurden.

6.11 Variante 1: Einrohrsystem

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Wärmegewinnung	Fr.	18700	143600	209200
- Leitung Wärmegewinnung	Fr.	4700	22600	31200
- Grabarbeiten; Pressvortrieb und Verlegen	Fr.	14000	121000	178000
Wärmeerzeugung	Fr.	234000	472300	732500
- Förderpumpe inkl. Kabel (2 mal in 15 J)	Fr.	12000	22000	44000
- Ein und Ausbau Förderpumpe (2 mal in 15 J)	Fr.	26000	35000	42000
- Wärmepumpe	Fr.	65900	143400	209300
- Zwischenkreis	Fr.	8300	16700	25100
- Energiespeicher	Fr.	10700	24600	35700
- Wärmezähler	Fr.	7700	15800	23500
- Heizkessel	Fr.	44500	97500	142000
- Hydraulische Einbindung	Fr.	7700	16000	56700
- Demontagen	Fr.	9000	18000	27000
- Baumeister	Fr.	4000	8000	13900
- Elektroinstallationen	Fr.	20700	41400	62100
- Sanitärinstallationen	Fr.	11000	19800	29000
- Diverses	Fr.	6500	14100	22200
Subtotal	Fr.	252700	615900	941700
Baunebenkosten		68229	166293	254259
- Honorar (22 %)	Fr.	55594	135498	207174
- Unvorhergesehenes 5 % von Subtotal	Fr.	12635	30795	47085
Total Investitionen	Fr.	320929	782193	1195959

Tabelle 6.1: Erforderl. Investitionen der Thermalwassernutzung bei Einleitung in Kanalisation

6.12 Variante 2: 2-Rohrsystem

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Wärmegewinnung		35000	167400	238000
- Leitung Wärmegewinnung	Fr.	6000	28400	39000
- Grabarbeiten; Pressvortrieb und Verlegen	Fr.	14000	124000	184000
- Anpassung bestehende Entsorgungsleitung	Fr.	15000	15000	15000
Wärmeerzeugung		234000	472300	732500
- Förderpumpe inkl. Kabel (2 mal in 15 J)	Fr.	12000	22000	44000
- Ein und Ausbau Förderpumpe (2 mal in 15 J)	Fr.	26000	35000	42000
- Wärmepumpe	Fr.	65900	143400	209300
- Zwischenkreis	Fr.	8300	16700	25100
- Energiespeicher	Fr.	10700	24600	35700
- Wärmezähler	Fr.	7700	15800	23500
- Heizkessel	Fr.	44500	97500	142000
- Hydraulische Einbindung	Fr.	7700	16000	56700
- Demontagen	Fr.	9000	18000	27000
- Baumeister	Fr.	4000	8000	13900
- Elektroinstallationen	Fr.	20700	41400	62100
- Sanitärinstallationen	Fr.	14600	23400	32600
- Diverses	Fr.	6500	14100	22200
Subtotal	Fr.	269000	639700	970500
Baunebenkosten		72630	172719	262035
- Honorar (22 %)	Fr.	59180	140734	213510
- Unvorhergesehenes 5% von Subtotal	Fr.	13450	31985	48525
Total Investitionen	Fr.	341630	812419	1232535

Tabelle 6.2: Erforderliche Investitionen der Thermalwassernutzung bei Rückführung in See

Aus der Zusammenstellung (Tabelle 6.1 und 6.2) geht hervor, dass sich die Gesamtkosten für ein Einrohrsystem nur unwesentlich von denen eines Zweirohrsystems unterscheiden. Für die folgenden Wirtschaftlichkeitsrechnungen wird deshalb nur noch der Fall des Zweirohrsystems weiter untersucht. Wegen der Einhaltung der Einleitungsbedingungen und auch wegen der Kosten für die Abwassergebühr ist vermutlich sowie so nur dieses System technisch und wirtschaftlich machbar.

Die Tabelle 6.2 zeigt, dass die notwendigen Investitionen für die Thermalwassernutzung stark davon abhängig ist, wieviel Wärmeverbraucher mit Thermalwasser versorgt werden sollen. Für den Fall, dass nur das Casino Zürichhorn versorgt wird, sind Investitionen in der Grössenordnung von Fr. 342'000 notwendig, im Vollausbau belaufen sich die Kosten dagegen auf über 1.2 Mio. Fr.

6.2. Annahmen für Wirtschaftlichkeitsrechnung

In der Tabelle 6.3 sind die Energiepreise angegeben, welche für die Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendet wurden. Die Werte entsprechen den Energiepreisen, wie sie heute in der Stadt Zürich bezahlt werden müssen, wobei für den Strompreis der Tarif für die Förderung von elektrischen Wärmepumpen zur Anwendung kommt. Unter der Voraussetzung, dass im Winter 84% und im Sommer 16 % der elektrischen Energie bezogen werden, ergibt sich ein Durchschnittspreis für den Strom von 12.5 Rp./kWh

Zusätzlich zu den aktuellen Energiepreisen enthält die Tabelle auch die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge, welche mögliche Umweltschäden berücksichtigt und zu den effektiven Preisen addiert werden müssen.

Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung, welche nach den Vorgaben der Stadt Zürich durchgeführt wurden (siehe Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsrechnung bei energetischen Massnahmen), sind weiter auch die Mittelwertfaktoren und Annuitäten sowie die anzunehmenden Unterhaltskosten angegeben.

- Ölpreis	Fr./100 lit.	26
- Ölpreis	Rp./kWh	2.6
- Strom HT Winter	Rp./kWh	15
- Strom NT Winter	Rp./kWh	11
- Strom HT Sommer	Rp./kWh	7
- Strom NT Sommer	Rp./kWh	5
- Durchschnittlicher Strompreis	Rp./kWh	12.5
- Kalkulatorischer Preiszuschlag Öl	Rp./kWh	4.5
- Kalkulatorischer Preiszuschlag Strom	Rp./kWh	5.0
- Mittelwertfaktor Energiepreisteuerung Öl	-	1.12
- Mittelwertfaktor Energiepreisteuerung Strom	-	1.08
- Nutzungsdauer Bau	Jahre	30.00
- Annuität 15 Jahre	%	8.10
- Annuität 30 Jahre	%	4.80
- Wartungs- und Unterhaltskosten Wärmepumpe	% der Investition	3
- Wartungs- und Unterhaltskosten Ölheizung	% der Investition	3
- Wartungs- und Unterhaltskosten Fernwärmeleitung	% der Investition	2

Tabelle 6.3: Annahmen für Wirtschaftlichkeitsrechnung

6.3. Kosten der Thermalwassernutzung

6.31 betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsrechnung

6.311 Variante 2: Zweirohrsystem

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer Wärmeerzeugungsanlage sind nicht nur die Investitionen, sondern ebenso die Jahreskosten, d.h. die jährlichen Aufwendungen für Kapitaldienst, Betrieb, Wartung und Unterhalt von Bedeutung. Daraus lassen sich auch die Wärmegestehungskosten berechnen.

In der Tabelle 6.4 sind diese Aufwendungen für alle 3 Ausbautetappen für den Fall einer rein betriebswirtschaftlichen Wirtschaftlichkeitsrechnung (mit effektiven Energiepreisen gerechnet) zusammengestellt.

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst		26517	60281	91982
- Wärmegewinnung (4,8 %)	Fr./a	1680	8035	11424
- Wärmeerzeugung (8.1 %)	Fr./a	18954	38256	59333
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	5883	13990	21225
- Subvention Stromsparfonds	Fr./a			
- Subvention Bund	Fr./a			
Betriebskosten		26263	63185	95695
- Wärmepumpe (Energie) (1.08)	Fr./a	21478	51219	74790
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	2153	4859	7216
- Thermalwasserpumpe (1.08)	Fr./a	2632	7107	13689
- Konzessionsgebühr	Fr./a			
Unterhalt und Wartung		7720	17517	26735
- Wärmegewinnung (2%)	Fr./a	700	3348	4760
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	7020	14169	21975
Jahreskosten				
- ganze Geothermieanlage	Fr./a	60500	140983	214412
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	9.8	9.6	10.0

Tabelle 6.4: Jahres- und Wärmegestehungskosten der Thermalwassernutzung bei Rückführung in See (ohne Berücksichtigung von Subventionen)

Gemäss dieser Zusammenstellung kann davon ausgegangen werden, dass sich in der 1. Ausbautetappe Jahreskosten von Fr. 60'500 und im Vollausbau von Fr. 214'412 ergeben. Setzt man diese Zahlen in Bezug zur produzierten Nutzwärme, so lassen sich die spezifischen Wärmegestehungskosten, d.h. der Preis berechnen, den eine kWh Wärme kostet. Wie die Tabelle 6.4 zeigt, sind die Wärmegestehungskosten praktisch unabhängig vom Ausbaugrad und betragen etwa 9.8 Rp./kWh.

Es ist davon auszugehen, dass im Falle einer Nutzung der Thermalbohrung Tiefenbrunnen Subventionen sowohl vom Stromsparfonds des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich als auch vom Bundesamt für Energie gewährt werden. Die oben angegebenen Kosten können deshalb mit grosser Wahrscheinlichkeit durch Subventionen reduziert werden. Wie gross der mögliche Subventionsbeitrag sein kann, hängt von den nicht amortisierbaren Mehrkosten ab. Das sind die Mehrkosten, die sich im Vergleich zu einer konventionellen Lösung (im Normalfall Ölheizung) ergeben und nicht abgeschrieben werden können. Von Gesetzes wegen darf der Beitrag an die nicht amortisierbaren Mehrkosten von Bund, Kanton und Dritten 50 % nicht übersteigen.

Die Tabelle 6.5 enthält basierend auf den Kosten für die Thermalwassernutzung und den Kosten einer Ölheizung (siehe Kapitel 6.4) die notwendigen Angaben um die nicht amortisierbaren Mehrkosten bez. die möglichen Subventionen zu berechnen.

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Investitionen				
- Thermalwassernutzung	Fr.	341630	812419	1232535
- Ölheizung	Fr.	128397	267589	450850
- Mehrinvestitionen	Fr.	213233	544830	761685
Betriebskosten				
- Thermalwassernutzung	Fr./a	26263	63185	95695
- Ölheizung	Fr./a	21228	50348	73644
- Mehrbetriebskosten	Fr./a	5035	12837	22051
Unterhalt und Wartung				
- Thermalwassernutzung	Fr./a	7720	17517	26735
- Ölheizung	Fr./a	3033	6321	10650
- Mehrunterhaltskosten	Fr./a	4687	11196	16085
Jährliche Mehrkosten	Fr./a	9722	24033	38136
jährliche Mehrkosten kapitalisiert (.07)	Fr.	138885	343328	544800
nicht amortisierbare Mehrkosten	Fr.	352118	888158	1306485
Max. mögliche Subventionen				
- Bund und Stromsparfonds	Fr.	176059	444079	653242
Anteil BFE	Fr.	88029	222039	326621
- Annuität (7%)	Fr./a	6162	15542	22863
Anteil Stromsparfonds	Fr.	88029	222039	326621
- Annuität (7%)	Fr./a	6162	15542	22863

Tabelle 6.5: Nicht amortisierbare Mehrkosten der Thermalwassernutzung im Vergleich zur Variante Ölheizung

Die Tabelle 6.5 zeigt, dass sich je nach Ausbaugrad recht hohe nicht amortisierbare Mehrkosten ergeben. Die daraus berechenbaren maximalen Subventionen betragen für die erste Ausbaustufe (Casino) Fr. 176'059 und im Vollausbau Fr. 653'242. Unter Annahme einer

mittleren Annuität von 7 % lassen sich diese Subventionen in mittlere jährliche Kosten umrechnen, die dann als Reduktion des Kapitaldienstes berücksichtigt werden können.

In der Tabelle 6.6 sind die Jahres- und Wärmegestehungskosten der Thermalwassernutzung unter Berücksichtigung dieser Subventionen zusammengestellt.

Die Zahlen zeigen, dass durch die finanzielle Unterstützung die jährlich Ausgaben wesentlich reduziert werden können. So liegen die Wärmegestehungskosten der Thermalwassernutzung im Falle von Subventionen nur noch bei 7.8 Rp./kWh. Dies entspricht einer Reduktion von 2 Rp./kWh.

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst		14193	29197	46256
- Wärmegewinnung (4,8 %)	Fr./a	1680	8035	11424
- Wärmeerzeugung (8.1 %)	Fr./a	18954	38256	59333
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	5883	13990	21225
- Subvention Stromsparfonds	Fr./a	6162	15542	22863
- Subvention Bund	Fr./a	6162	15542	22863
Betriebskosten		26263	63185	95695
- Wärmepumpe (Energie) (1.08)	Fr./a	21478	51219	74790
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	2153	4859	7216
- Thermalwasserpumpe (1.08)	Fr./a	2632	7107	13689
- Konzessionsgebühr	Fr./a			
Unterhalt und Wartung		7720	17517	26735
- Wärmegewinnung (2%)	Fr./a	700	3348	4760
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	7020	14169	21975
Jahreskosten				
- ganze Geothermieanlage	Fr./a	48176	109899	168686
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	7.8	7.5	7.8

Tabelle 6.6: Jahres- und Wärmegestehungskosten der Thermalwassernutzung bei Rückführung in See (mit Berücksichtigung von Subventionen)

6.32 erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung mit externen Kosten

6.312 Variante 2: Zweirohrsystem

Neben einer rein betriebswirtschaftlichen Wirtschaftlichkeitsrechnung, welche die effektiven Kosten und allfällige Subventionen berücksichtigt, kann auch eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Einbezug der externen Kosten durchgeführt werden. Diese berücksichtigt die Umweltkosten und führt damit zu höheren effektiven Kosten.

Die sich für diesen Fall ergebenden Kosten sind in der Tabelle 6.7 zusammengestellt.

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst		26517	60281	91982
- Wärmegewinnung (4.8%)	Fr./a	1680	8035	11424
- Wärmeerzeugung (8.1%)	Fr./a	18954	38256	59333
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	5883	13990	21225
		39637	94932	143586
Betriebskosten				
- Wärmepumpe (Energie) (1.08)	Fr./a	30069	71706	104706
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	5883	13276	19716
- Thermalwasserpumpe (1.08)	Fr./a	3685	9949	19164
- Konzessionsgebühr	Fr./a			
		7720	17517	26735
Unterhalt und Wartung				
- Wärmegewinnung (2%)	Fr./a	700	3348	4760
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	7020	14169	21975
Jahreskosten				
- ganze Geothermieanlage	Fr./a	73874	172730	262303
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	11.9	11.8	12.2

Tabelle 6.7: Jahres- und Wärmegestehungskosten der Thermalwassernutzung bei Rückführung in See mit Berücksichtigung externer Kosten

Die Zusammenstellung zeigt, dass die Betriebskosten (Stromkosten für Wärmepumpe, Tauchpumpe und Ölkessel) in diesem Fall massiv ansteigen und zu deutlich höheren Wärmegestehungskosten führen. Sie sind für alle Ausbaustufen relativ konstant und betragen etwa 11.9 Rp./kWh.

6.4. Vergleich mit konventioneller Anlage

6.4.1. Investitionen

In den folgenden Tabellen sind die Investitionen zusammengestellt, die in den verschiedenen Ausbautetappen im Falle einer konventionellen Heizung notwendig sind. Tabelle 6.8 geht dabei davon aus, dass in allen Gebäuden (Casino Zürichhorn, Alterssiedlung und Baurstrasse) eine neue Ölheizung installiert wird. Diese Kostenschätzung berücksichtigt also nicht, dass vom Alter her nur im Casino die Heizung vollständig erneuert werden muss und dass die Heizungen in der Alterssiedlung und an der Baurstrasse im Prinzip weiter betrieben werden könnten. Diese Kosten stellen damit einen oberen Grenzwert dar.

Demgegenüber wird in Tabelle 6.9 angenommen, dass die Heizung nur im Casino sofort erneuert und in der Alterssiedlung und an der Baurstrasse erst nach Erreichen ihrer Nutzungszeit (15 Jahre) saniert werden. In der Alterssiedlung wurde die Heizung 1993 (Alter 5 Jahre) und an der Baurstrasse 1988 (Alter 10 Jahre) saniert, so dass effektiv nur 1/3 resp. 2/3 der Sanierungskosten berücksichtigt werden müssen. Diese Kostenschätzung entspricht also etwa den wirklichen Verhältnissen.

		1. Etappe	2. Etappe	Vollaus- bau
Wärmeerzeugung		101100	210700	355000
- Heizkessel.	Fr.	59000	129100	190000
- Wärmezähler	Fr.	8100	16200	24300
- Demontagen	Fr.	9000	18000	27000
- Baumeister	Fr.	2700	5400	11300
- Elektroinstallationen	Fr.	14400	28800	43200
- Sanitärinstallationen	Fr.	4500	9000	13500
- Diverses	Fr.	3400	4200	5000
- Hydraulische Einbindung	Fr.			40700
Baunebenkosten		27297	56889	95850
- Honorar (22 %)		22242	46354	78100
- Unvorhergesehenes 5% von Wärmeerzeugung	Fr.	5055	10535	17750
Total Investitionen	Fr.	128397	267589	450850

Tabelle 6.8: Erforderliche Investitionen mit konventioneller Anlage (alle Ölheizungen neu)

		1. Etappe	2. Etappe	Vollaus- bau
Wärmeerzeugung		101100	141500	210900
- Heizkessel.	Fr.	59000	87700	136600
- Wärmezähler	Fr.	8100	8100	8100
- Demontagen	Fr.	9000	12000	17800
- Baumeister	Fr.	2700	4000	7500
- Elektroinstallationen	Fr.	14400	20400	29700
- Sanitärinstallationen	Fr.	4500	4500	4500
- Diverses	Fr.	3400	4800	6700
- Hydraulische Einbindung	Fr.			
Baunebenkosten		27297	38205	56943
- Honorar (22 %)		22242	31130	46398
- Unvorhergesehenes 5% von Wärmeerzeugung	Fr.	5055	7075	10545
Total Investitionen	Fr.	128397	179705	267843

Tabelle 6.9: Erforderliche Investitionen mit konventioneller Anlage (nur Ölheizung neu in Casino, + Sanierungskosten für Alterssiedlung und Baurstrasse

6.42. Kosten einer Ölheizung

Tabelle 6.10 bis 6.13 zeigen die Kosten einer konventionellen Ölheizung.

6.421 betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsrechnung

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst				
- Wärmeerzeugung (8.1%)	Fr./a	8189	17066	28755
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	2211	4608	7763
Betriebskosten				
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	21228	50348	73644
Unterhalt und Wartung				
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	3033	6321	10650
Jahreskosten				
- Ölheizung total	Fr./a	34661	78343	120812
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	5.6	5.3	5.6

Tabelle 6.10: Jahres- und Wärmegestehungskosten einer Ölfeuerung (alle Ölheizungen neu)

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst				
- Wärmeerzeugung (8.1%)	Fr./a	8189	11461	17083
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	2211	3094	4612
Betriebskosten				
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	21228	50348	73644
Unterhalt und Wartung				
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	3033	4245	6327
Jahreskosten				
- Ölheizung total	Fr./a	34661	69148	101666
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	5.6	4.7	4.7

Tabelle 6.11: Jahres- und Wärmegestehungskosten einer Ölfeuerung (nur Ölheizung neu in Casino + Sanierungskosten für Alterssiedlung resp. Baurstr.)

6.422 erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung mit externen Kosten

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst				
- Wärmeerzeugung (8.1%)	Fr./a	8189	17066	28755
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	2211	4608	7763
Betriebskosten				
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	57970	137490	201106
Unterhalt und Wartung				
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	3033	6321	10650
Jahreskosten				
- ganze Geothermieanlage	Fr./a	71403	165485	248274
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	11.5	11.3	11.5

Tabelle 6.12: Jahres- und Wärmegestehungskosten einer Ölfeuerung mit Berücksichtigung externer Kosten (alle Ölheizungen neu)

		1. Etappe	2. Etappe	Vollausbau
Kapitaldienst				
- Wärmeerzeugung (8.1%)	Fr./a	8189	11461	17083
- Honorar und Unvorhergesehenes	Fr./a	2211	3094	4612
Betriebskosten				
- Heizkessel (Energie) (1.12)	Fr./a	57970	137490	201106
Unterhalt und Wartung				
- Wärmeerzeugung (3%)	Fr./a	3033	4245	6327
Jahreskosten				
- ganze Geothermieanlage	Fr./a	71403	156290	229128
- Wärmelieferung	MWh	620	1470	2150
Wärmegestehungskosten				
- spezifisch	Rp/kWh	11.6	10.6	10.7

Tabelle 6.13: Jahres- und Wärmegestehungskosten einer Ölfeuerung mit Berücksichtigung externer Kosten (nur Ölheizung neu in Casino + Sanierungskosten für Alterssiedlung resp. Baurstr.)

Rein betriebswirtschaftlich d.h. mit heutigen Energiepreisen gerechnet, weist die Ölheizung Wärmegestehungskosten auf, die deutlich unter denen der Thermalwassernutzung liegen. Unter Annahme, dass alle bestehenden Ölheizungen erneuert werden, so ergeben sich praktisch unabhängig vom Ausbaugrad spezifische kWh-Preise von 5.6 Rp./kWh. In Wirklichkeit, d.h. unter Berücksichtigung des Alters der Heizungen, liegen die Wärmegestehungskosten für die zweite Ausbaustufe und den Vollausbau sogar noch tiefer (4.7 Rp./kWh).

Im Vergleich dazu betragen die entsprechenden Kosten der Thermalwassernutzung 9.8 Rp./kWh und mit Berücksichtigung von Subventionen etwa 7.8 Rp./kWh.

Dieses Resultat ist einerseits die Folge davon, dass alternative Wärmeerzeugungsanlagen im allgemeinen sehr kostenintensiv sind und darum in praktisch allen Fällen höhere Investitionen benötigen als konventionelle Anlagen. Bei den heutigen tiefen Ölpreisen kommt dazu, dass auch die Energiekosten bei neuen Energiesystemen wie z.B. Wärmepumpen wegen der hohen Strompreise oft höher sind als bei herkömmlichen Anlagen. Dies führt dazu, dass solche neuen erneuerbaren Anlagen nur dann Chancen haben realisiert zu werden, wenn von Bund, Kanton, Gemeinden oder Dritten Subventionen an solche Anlagen bezahlt werden.

Anders sieht die Situation aus, wenn die Wirtschaftlichkeitsrechnungen unter Einbezug von externen Kosten durchgeführt werden. In diesem Fall weisen sowohl Thermalwassernutzung als auch Ölheizung Wärmegestehungskosten von etwa 11.5 - 12.0 Rp./kWh auf, sind also durchaus miteinander vergleichbar.

In den Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsrechnung bei energetischen Massnahmen, wird empfohlen, primär die erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Einbezug der externen Kosten als Entscheidungsgrundlage zu verwenden. Erst dann soll eine rein betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsrechnung erstellt werden. Es ist zu hoffen, dass sich die Stadt Zürich an diese Vorgaben hält und mit gutem Beispiel voran geht.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass Kunden bereit sind, für umweltfreundliche Energie einen Wärmepreis zu bezahlen, der etwa 10% bis max. 20 % höher liegt als bei Öl. Bei einem Wärmepreis von 5.6 Rp./kWh bei der Ölheizung dürfte der entsprechende Wärmepreis bei der Thermalwassernutzung also maximal 6.7 Rp./kWh betragen. Der effektive Wärmegestehungspreis der Thermalwassernutzung liegt mit Berücksichtigung von Subventionen bei 7.8 Rp./kWh. Der Unterschied zwischen diesen beiden Systemen ist damit nicht allzu gross, so dass auch rein betriebswirtschaftlich die Realisierung der Thermalwassernutzung empfohlen werden kann.

7. Abklärungen bezüglich Realisierung

7.1. Bisherige Kontakte und Verhandlungen

Im Zusammenhang mit den Abklärungen über die Möglichkeiten der Wärmenutzung aus der Thermalbohrung Tiefenbrunnen fand neben zahlreichen technischen Gesprächen am 22.12.1997 eine erste Sitzung mit den Industriellen Betrieben der Stadt Zürich und dem EWZ statt. Eine weitere Sitzung nur mit den Industriellen Betrieben (Dr. Lenzlinger) ging am 14.2.1998 vonstatten.

Das Ziel beider Treffen war die Festlegung des Pflichtenheftes für die Machbarkeitsstudie. So wurde z.B. vereinbart, welche Gebiete und Ausbautetappen in der Studie untersucht werden sollten (nur Casino Zürichhorn sowie zusätzliche Gebäude jenseits der Bellerivestrasse). Weiter wurde auch festgelegt, wie die Wirtschaftlichkeitsrechnungen durchgeführt werden sollten (betriebswirtschaftlich mit und ohne Subventionen sowie mit Einbezug der externen Kosten). Dies vor allem um den Industriellen Betrieben und dem EWZ die notwendigen Entscheidungsgrundlagen in der ihnen gewünschten Form zu liefern.

7.2. Trägerschaften und mögliche Organisationsformen

An der Sitzung vom 22.12.1997 haben die Herren Gerhard Emch, Leiter Abteilung Energiedienstleistungen und Peter Feucht Abteilungsleiter Verkauf Energiedienstleistungen zum Ausdruck gebracht, dass das EWZ beabsichtigt, im Ausführungsfalle das Projekt als Contractor zu übernehmen. Dies würde bedeuten, dass das EWZ die dafür notwendigen Investitionen tätigen würde. Weiter würde die Aufgabe des EWZ auch darin bestehen, das Wärmeversorgungssystem von der Wärmegewinnung über die Wärmeerzeugung zu betreiben und die Wärme dann als Energiedienstleistung an den Endabnehmer zu verkaufen.

Das sind Aufgaben, wie sie auch sonst bei Stromversorgungsunternehmen anfallen und deshalb ohne grossen Aufwand von einer solchen Trägerschaft übernommen werden könnten.

Neben einer Trägerschaft durch das EWZ ist es auch denkbar, dass die Stadt Zürich in ein solches Projekt mit eingebunden wird. Dies wäre sinnvoll, weil sowohl das Casino Zürichhorn als auch die Alterssiedlung städtische Liegenschaften sind.

Welches die optimalste Lösung im Falle einer Wärmenutzung aus der Bohrung Tiefenbrunnen ist, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beantwortet werden und muss Gegenstand weiterer Gespräche sein. Es kann aber angenommen werden, dass dafür eine Lösung gefunden wird, sofern ein Interesse an einer solchen Nutzung vorhanden ist.

7.3. Möglicher Zeitplan für Realisierung

Ein gewisser Zeitdruck für die Realisierung einer Thermalwassernutzung ist durch den Umstand gegeben, dass sich der Heizkesseleratz des Casino Zürichhorn als interessantester Verbraucher wegen der Luftreinhalteverordnung nicht mehr weiter aufschieben lässt. Bei der Alterssiedlung und auch den Liegenschaften an der Baurstrasse ist dagegen kein dringender Handlungsbedarf vorhanden. Der Mietvertrag mit dem heutigen Pächter des Casino Zürichhorn (Herr Wolf) läuft Ende 1998 aus und es ist deshalb anzunehmen, dass 1999 entweder der alte Ölkessel durch einen neuen Kessel ersetzt wird oder die Thermalwassernutzung realisiert werden könnte.

Als nächste dringende Schritte müssen deshalb beim BFE und beim Stromsparfonds des EWZ Anträge für eine Mitfinanzierung des Projektes gestellt werden. Sobald die Finanzierung gesichert ist, muss das Bauprojekt und die Ausschreibung dann weiter geführt werden.

8. Umweltaspekte

Mit der energetischen Nutzung des Thermalwassers aus der Bohrung Tiefenbrunnen können beträchtliche Mengen an fossilen Energieträgern eingespart werden.

Wie die folgende Tabelle 8.1 zeigt, entspricht die Einsparung in der 1. Ausbaustufe etwa 56 t Heizöl pro Jahr. Im Vollausbau (Casino, Alterssiedlung, Baurstrasse) liessen sich sogar 195 t Heizöl substituieren.

Neben diesem beträchtlichen Einsparpotential an nicht erneuerbaren Energieträgern, können mit der Thermalwassernutzung auch die Emissionen von Schadstoffen stark reduziert werden.

		Thermalwasser Nutzung			Konventionelle Anlage			Einsparungen		
		1. Etap.	2. Etap.	Vollausbau	1. Etap.	2. Etap.	Vollausbau	1. Etap.	2. Etap.	Vollausbau
Oelverbrauch	to/a	6.4	15.1	22.0	62.3	148.6	216.9	55.9	133.5	194.9
Nox-Emissionen	kg/a	6.7	13.8	20.1	57.7	135.8	198.1	51.0	122.0	178.0
SO ₂ -Emissionen	kg/a	18.4	44.0	64.2	186.3	444.5	649.1	167.9	400.5	584.8
CO ₂	t/a	14.8	35.2	51.5	145.8	347.2	507.5	131.0	312.0	456.0

Tabelle 8.1: Primärenergieeinsparungen und Schadstoffausstoss

Anhang

Rybach, L., Stürzinger, P. (1979): Geothermische Energie und die Schweiz.
Embassy of Switzerland in US Bull. 19, 40-48

Mégel, t. (1996): Aquifer-Bewirtschaftung der geothermischen Energienutzung, Diss. ETH Nr. 11983

Büchi, U. P. (1980): Thermalwasserbohrung Tifenbrunnen Zürich, interner Bericht Nr. 1094 des Büros Dr. Büchi AG

Büchi, U. P. (1982): Pumpversuch II, Thermalwasserbrunnen der Stadt Zürich, interner Bericht 1441 der Büros Dr. Büchi AG