

Energiepfähle: Beispiel Dock Midfield

Markus Hubbuch, Electrowatt Engineering AG, CH - 8034 Zürich

Zusammenfassung

Das Dock Midfield, ein 500m langer Neubau für die 5. Ausbaustufe des Flughafens Zürich, muss wegen schlechtem Baugrund auf über 350 Pfählen fundiert werden. Es sind stehende Bohrpfähle mit 1 bis 1,5 Meter Durchmesser vorgesehen, welche bis in die Grundmoräne in ca. 30 Meter Tiefe reichen. Zur Energiegewinnung ist vorgesehen, die Fundationspfähle als Energiepfähle zu nutzen. Um diese neuartige Anlage sicher planen zu können, ist zusammen mit der EPFL ein Projekt in Arbeit, welches vom Bundesamt für Energie unterstützt wird. Die Energiepfählanlage und ihre Einbindung ins Energiekonzept des Gebäudes wird detailliert simuliert. Zur Bestimmung der thermischen Bodenkennwerte wurde zudem ein sogenannter Response-Test durchgeführt und durch die EPFL ausgewertet.

Mit den Energiepfählen kann die interne Abwärme im Sommer im Untergrund gespeichert und im Winter zu Heizzwecken genutzt werden. Dadurch werden ca. 1100 MWh Wärmeenergie gewonnen. Nur noch für wenige Spitzen muss Fernwärme ab der zentralen Wärme- Kraftkoppelungsanlage des Flughafens Zürich bezogen werden. Der Mehrstrombedarf für die Wärmepumpe wird dank der Kälteproduktion im Sommer kompensiert. Der jährliche Strombedarf verändert sich kaum. Die Energiepfählanlage ist im Vergleich mit der Fernwärme wirtschaftlich vertretbar, die Jahreskosten werden etwa gleich.

Résumé

Le Dock Midfield, un nouveau bâtiment de 500m de long prévu dans la 5e étape de construction de l'aéroport de Zurich, doit être construit sur 350 pieux de fondation en raison des mauvaises conditions géologiques locales. Les pieux, forés avec un diamètre compris entre 1 et 1.5 m, s'appuieront sur la couche de moraine, située à environ 30m de profondeur. Pour des raisons de gains d'énergie, il est prévu d'utiliser les pieux de fondation en pieux échangeurs. Afin de pouvoir planifier cette installation innovatrice de manière sûre, un projet en commun avec l'EPFL est en cours, lequel est soutenu financièrement par l'Office fédéral de l'énergie. Le système de pieux échangeurs et son intégration dans le concept énergétique du bâtiment sera simulé en détail. Un "test de réponse" a été réalisé pour la détermination des propriétés thermiques in situ du terrain, dont l'interprétation a été effectuée à l'EPFL.

Grâce aux pieux échangeurs, le surplus des gains internes du bâtiment peut être stocké dans le terrain en été, et utilisé en hiver pour satisfaire des besoins de chauffage. De cette manière, environ 1100 MWh d'énergie thermique seront gagnés. Seules quelques pointes de puissance thermique doivent être couvertes par le réseau de chauffage à distance de la centrale chaleur-force de l'aéroport de Zürich. La consommation d'énergie électrique supplémentaire induite par les pompes à chaleur est compensée par la production d'énergie frigorifique en été, qui nécessite beaucoup moins d'énergie électrique grâce à l'utilisation des pieux en "free-cooling". La demande d'énergie électrique annuelle est à peine modifiée relativement à un système conventionnel (chauffage à distance en hiver et machines frigorifiques en été). En comparaison avec le chauffage à distance, l'installation avec pieux échangeurs peut être considérée comme économique; les coûts annuels sont à peu près les mêmes.

1. Einleitung, Ziel des Projektes

Für die 5. Bauetappe des Flughafens ist ein neues Terminalgebäude für 26 Flugzeugstandplätze zwischen den heutigen Pisten erforderlich, das Dock Midfield /1/. Die ARGE ZAYETTA¹ hat von der Flughafen-Immobilien-Gesellschaft (FIG) den Auftrag erhalten, dieses 500 m lange und 30 m breite Gebäude zu planen. Entscheidend für diese Auftragserteilung waren neben den architektonischen Qualitäten des Projektes auch das Bestreben, ein Niedrig-Energiegebäude zu realisieren, ohne dass dafür Mehrinvestitionen in Kauf genommen werden müssen.

Das Energiekonzept für dieses Gebäude basiert auf möglichst sparsamen, korrekt dimensionierten Anlagen, bedarfsabhängigen Steuerungen, einer konsequenten Nutzung der Abwärme, freier Kühlung und der Nutzung von regenerativer Energie. Dabei bilden die Energiepfähle nicht nur das Fundament des Gebäudes, sondern auch die Grundlage der Wärmeerzeugung.

Insgesamt gelingt es, mit den vorgesehenen Massnahmen 65% des Wärmebedarfes und 75% des Kältebedarfes mit regenerativer Energie zu decken. Der verbleibende Energiebedarf für Wärme wird sehr klein, die Energiekennzahl Wärme wird etwa 30 MJ/m²a (inkl. Antriebsstrom für Wärmepumpen). Die Energiekennzahl Strom wird ebenfalls tief: 400 MJ/m²a, und dies für ein vollklimatisiertes Gebäude, welches jeden Tag 18 h in Betrieb ist!

Bild 1 zeigt den Vergleich der Energiekennzahlen von verschiedenen Flughafenbauten.

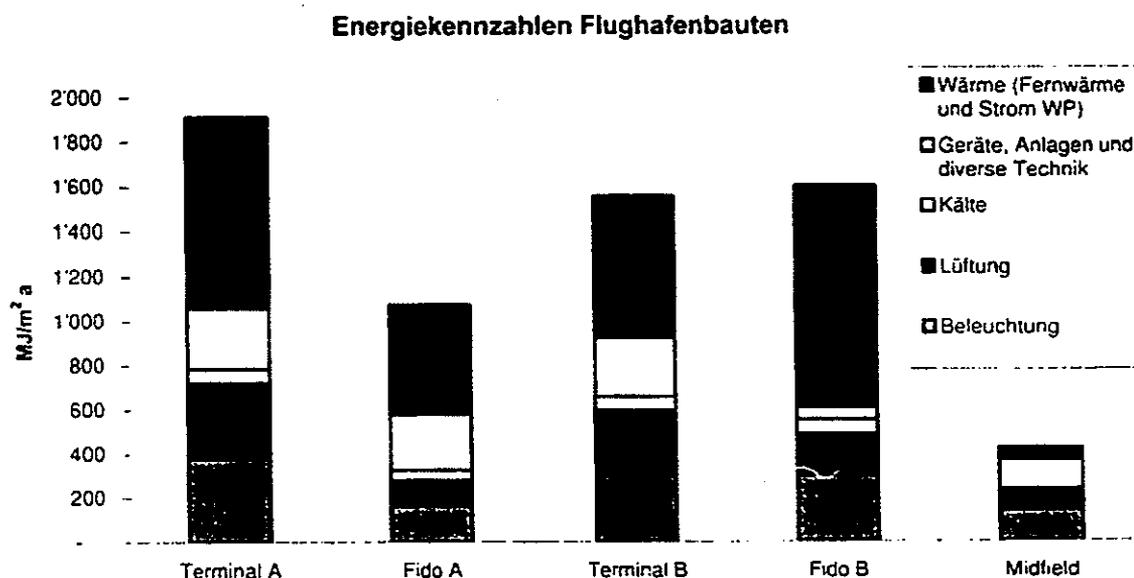
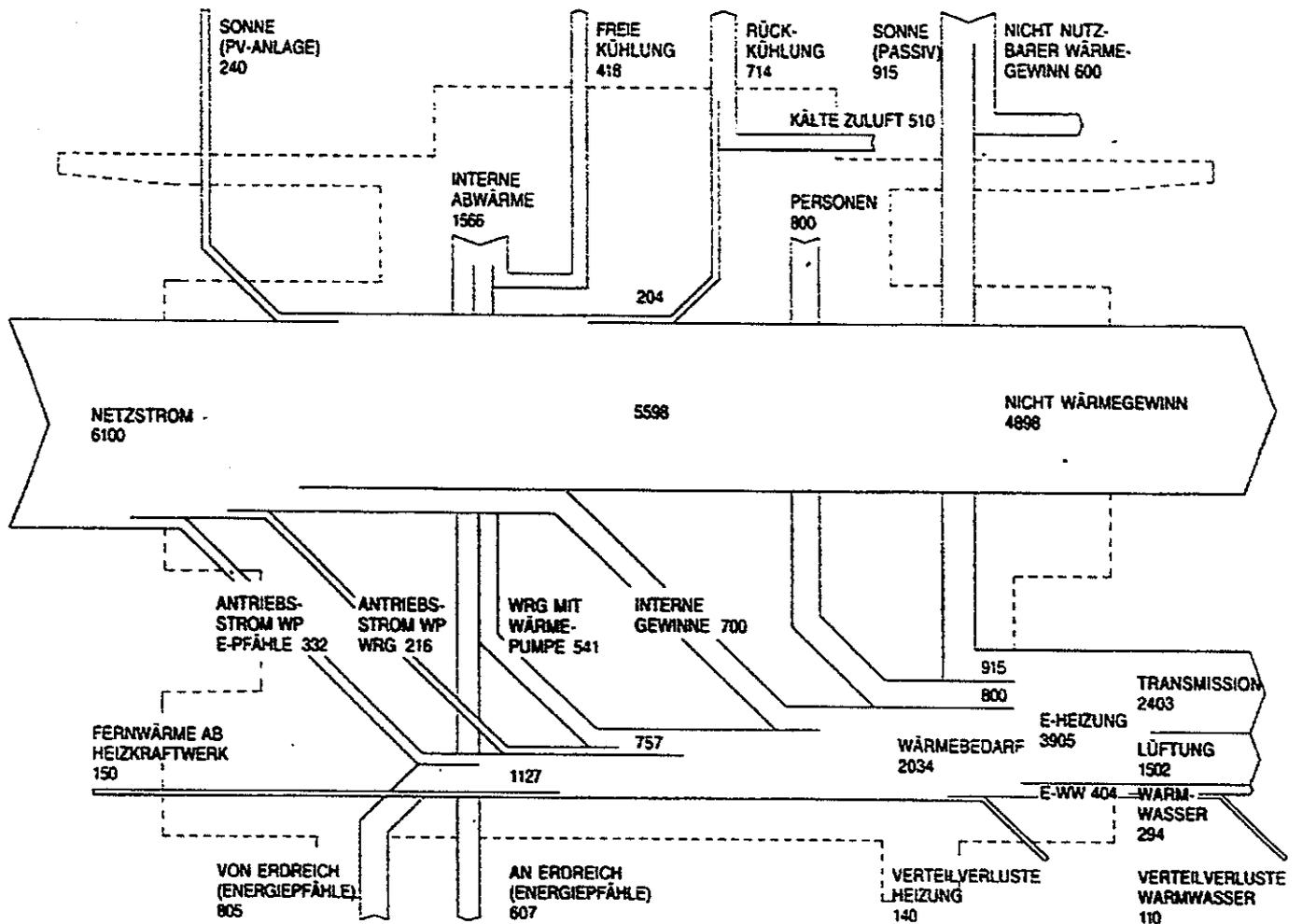


Bild 1: Aus dem Vergleich mit Flughafenbauten älteren Datums wird der enorme Fortschritt in der Gebäudetechnik und der Nutzung regenerativer Energie ersichtlich.

Die Realisierung von grosskalibrigen Energiepfählen für eine saisonale Speicherung von Wärme im grossen Massstab stellt für die Schweiz ein Novum dar. Deshalb unterstützt das Bundesamt für Energie (BFE) das Projekt zur Erarbeitung der Planungsgrundlagen und für eine detaillierte Simulation der Energiepfählanlage und der Einbindung in das Wärmeversorgungs-Konzept des Gebäudes, was wir hiermit bestens verdanken.

¹ ARGE ZAYETTA: Martin Spühler, Architekt BSA SIA, Zürich; Angélie/Graham/Pfenninger/Scholl Architecture Ltd. Zürich und Los Angeles; Heyer Kaufmann Partner Bauingenieure AG, Zürich; Nicolet, Chartrand, Knoll Ltd, Montreal; Electrowatt Engineering AG, Zürich



ENERGIEFLUSSDIAGRAMM
DOCK MIDFIELD

Bild 2: Das vorausberechnete Energieflussdiagramm für Wärme und Strom dient der Optimierung des Energiekonzeptes. Deutlich wird der Wärmeaustausch über die Energiepfähle und der sehr kleine Fernwärmebezug.

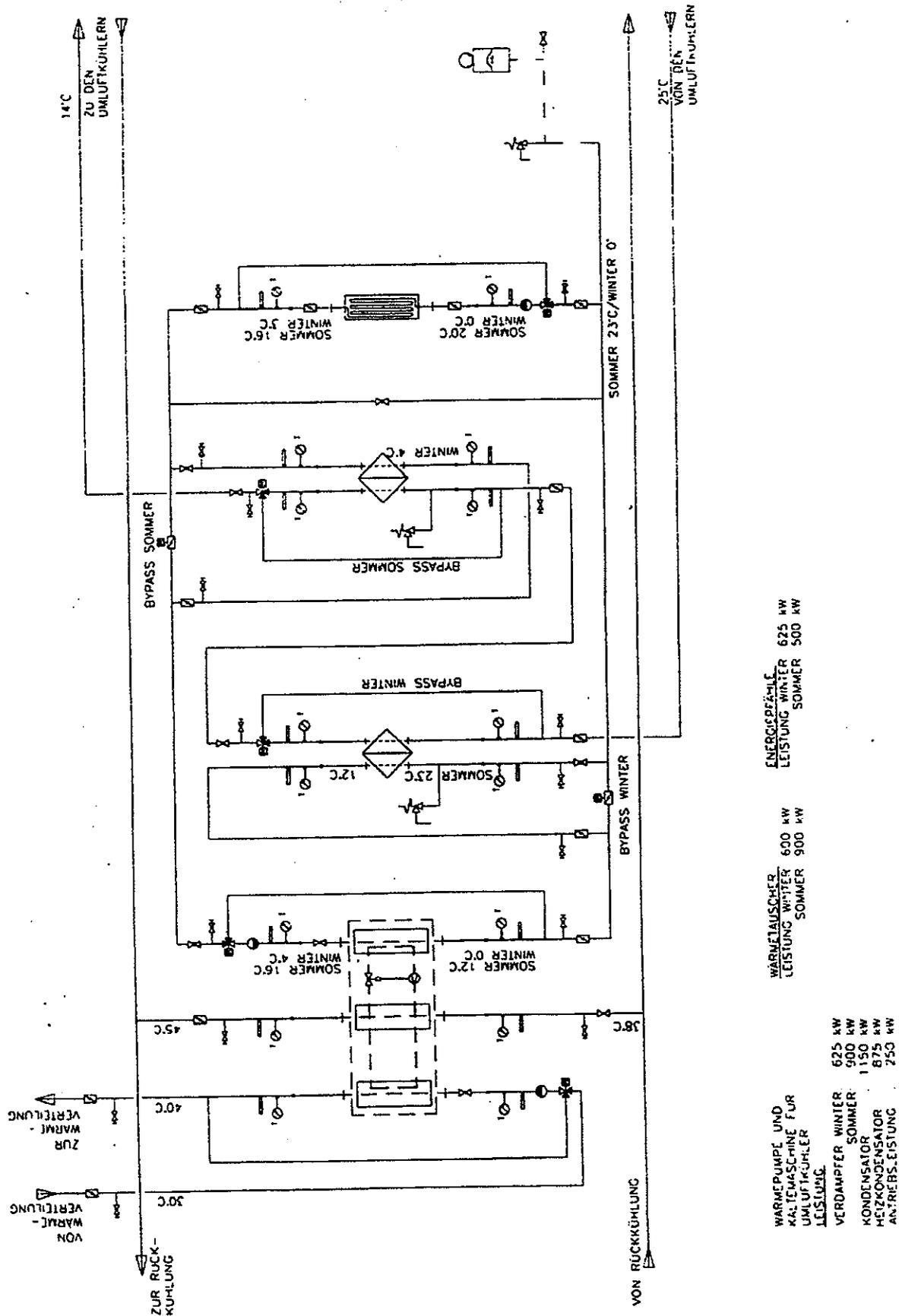


Bild 3: Das Wärme- und Kälteerzeugungsschema zeigt die Einbindung der Energiefähle in die Gebäudetechnik. Die Wärmepumpe der Energiefähle kann auch als Kältemaschine genutzt werden, was es erlaubt, Spitzen abzudecken und eine Redundanz zur direkten Kühlung über die Pfähle darstellt.

2. Vorgehen

Als erster Schritt wurde ein Wärmeversorgungskonzept erarbeitet, welches den Einbezug der Energiepfähle und der internen Abwärme ermöglicht. Bild 2 zeigt das vorausberechnete Energieflussdiagramm. Das Heizungs/Kälteschema (Bild 3) zeigt das gewählte Prinzip, welches mit nur einem als Wärmepumpe und Kältemaschine genutzten Aggregat auskommt.

Im Sommer wird die im Wärmeabfuhrnetz gesammelte interne Abwärme an den Untergrund abgegeben. Im Hochsommer (Spitzenbedarf) oder falls der Erdspeicher schon gefüllt ist (Erdtemperatur zu hoch) kann die Abwärme auch mit der nun als Kältemaschine genutzten Maschine über die benetzten Kühltürme an die Aussenluft abgegeben werden. In der Übergangszeit wird die interne Abwärme mit Free-Cooling an die Aussenluft abgeführt. Damit kann eine Überladung des Erdspeichers vermieden werden. Daneben sind zwei konventionelle Kältemaschinen vorhanden, welche den Kältebedarf für die Kühlung der Aussenluft bei warmer Witterung erzeugen und völlig getrennt funktionieren.

Im Winter wird primär die interne Abwärme genutzt, wobei nun die Wärmepumpen-Funktion genutzt wird. Die ganze Wärmeverteilung im Dock Midfield erfolgt auf einem Temperaturniveau von maximal 45°C. Falls das Angebot an interner Abwärme nicht mehr ausreicht, wird zusätzlich Wärme aus dem Erdspeicher entzogen. Für sehr kalte Tage mit hohem Wärmeleistungsbedarf kann Fernwärme bezogen werden.

Von den statisch erforderlichen Pfählen werden ca. 300 als Energiepfähle genutzt. Die restlichen ca. 50 Pfähle können nicht genutzt werden, da sie zu nahe beieinander stehen. Die Pfähle werden mit je 8 am Umfang verteilten PE-Rohren ausgerüstet. Die wirksame Pfahlänge beträgt 25 m.

Dieses anspruchsvolle Energiekonzept verlangt eine entsprechend seriöse Planung. Um den Wärmeenergiebedarf des Gebäudes möglichst genau und stundenweise zu kennen, wurde durch die EMPA /2/ eine dynamische Simulation des Gebäudes durchgeführt. Aufgrund dieser Ergebnisse konnte eine stundenweise Berechnung der Energieflüsse im Gebäude und der Energieaustausch mit dem Untergrund gerechnet werden. Die EPFL hat diese Simulationen aufgrund der ersten Bedarfswerte durchgeführt und damit die Grundlagen für die weitere Optimierung geliefert. In einem zweiten Schritt werden die Energiebedarfswerte und die Simulation der Energiepfahl-Anlage nochmals überarbeitet /3/.

Response-Test zur Messung der thermischen Bodenleitfähigkeit

Ein weiterer Faktor ist die thermische Bodenleitfähigkeit. Aus den Untersuchungen des Geologen /4/ ist der Bodenaufbau gut bekannt. Die thermischen Kennwerte hingegen können mit den normalen Sondierbohrungen nicht gemessen werden. Eine Messung im Labor ist schwierig und aufwendig. Deshalb wurden zwei Erdsonden auf 33 Meter Tiefe abgeteuft (Tiefe der geplanten Pfahlfüsse) und ein sogenannter Response-Test durchgeführt /5/.

Während ca. 1 Woche wurde jede der beiden Sonden mit elektrisch erwärmten Wasser (ca. 1,5 kW Leistung resp. ca. 50 W/m Sondenlänge, konstant) durchflossen. Mittels Datenlogger wurden die Temperaturen und die Abkühlung registriert. Aus diesen Daten werden die thermischen Bodenkennwerte berechnet.

3. Resultate

Response-Test

Der Response-Test, welcher Anfangs 1998 durchgeführt wurde, lieferte als Resultat die ungestörte Bodentemperatur über die ersten 33 Meter und den Wert für die thermische Bodenleitfähigkeit.

Die Messung Ost ergab 11.0°C, die Messung West 10.0°C für die unbeeinflusste Bodentemperatur. Es stellt sich natürlich sofort die Frage, weshalb dieser Unterschied von einem Grad besteht. Die Sonden sind nur 185 Meter auseinander. Ein Messfehler kann ausgeschlossen werden, da die Temperaturen je im Vor- und Rücklauf gemessen wurden. Unsere Erklärung ist die folgende:

Die Messung West fand direkt neben einem kleinen Waldstück statt, die Messung Ost dagegen auf freiem Feld, in der Nähe eines Rollweges und einer Strasse. Das Waldstück bewirkt durch verstärkte Verdunstung und Beschattung eine örtliche Reduktion der durchschnittlichen Lufttemperatur. Dies wirkt sich offensichtlich auch auf die Bodentemperatur aus, welche in dieser Tief ja ein Abbild der durchschnittlichen Lufttemperatur darstellt. Dass sich diese Temperaturdifferenz so deutlich ausbildet, lässt sich auch mit dem fehlenden Grundwasserfluss erklären.

Die Auswertung der Messungen durch die EPFL, ergibt einen Wert von $1,95 \text{ W/mK}$ ($\pm 0,15 \text{ W/mK}$ Messungsgenauigkeit). Dieser Wert entspricht etwa dem Mittelwert der Literaturangaben

Für uns als Planer und für den Bauherrn führte dieser Response-Test auch zu grossem Vertrauen in die Ergebnisse der Simulationsrechnungen und deren Resultate. Die vorgängig simulierte Resultate und die Messwerte stimmten sehr gut überein. Bild 4 zeigt ein Foto der Messeinrichtung.

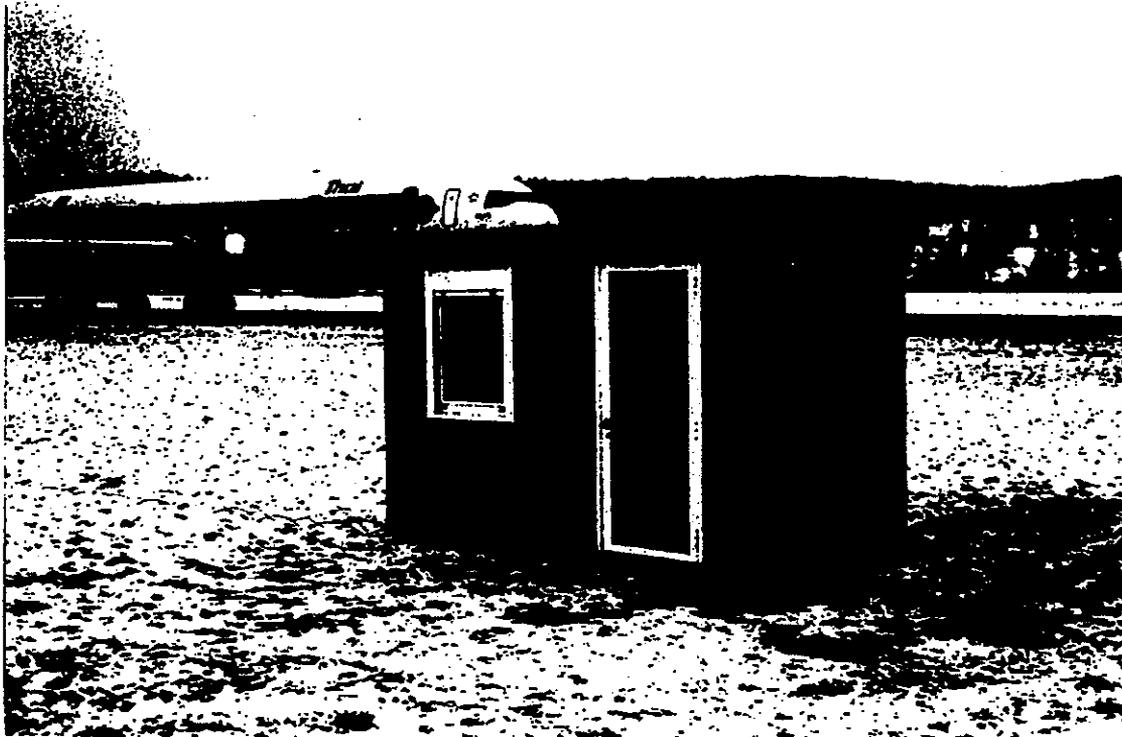


Bild 4: Das Foto zeigt den Container neben dem Rollweg und die Leitungen zur Erdsonde

Simulation der Energiepfahlanlage

Die Simulation der Energiepfahlanlage zeigt den zu erwartenden Gewinn und die mögliche Wärme- und Kälteleistung unter den gegebenen Randbedingungen. Es zeigen sich aber auch Grenzen, die zu respektieren sind. So muss das Verhältnis von entzogener Wärme und abgeführter Wärme stimmen, wenn man Probleme mit einer langfristigen Aufwärmung oder Abkühlung des Bodens verhindern will. Im vorliegenden Fall muss etwa 30 % mehr Wärme entzogen werden als abgegeben werden kann, um eine langfristige Aufwärmung des Bodens zu vermeiden. Dies ist mit der Wärmeabgabe des Kellergeschosses an den Boden zu erklären.

Unter der gegebenen Randbedingung, dass beim Wärmeentzug 0°C Vorlauftemperatur in die Pfähle nicht unterschritten werden darf, und im Sommer für direkte Wärmeabfuhr 20°C Vorlauftemperatur nicht überschritten werden soll, ergibt sich eine maximal entziehbare Leistung von 570 kW oder 75 W/m. Diese Leistung kann aber nur während einer relativ kurzen Zeit und nicht als Dauerleistung entzogen werden. Dazwischen sind Regenerationspausen erforderlich. Die pro Pfahlmeter gewinnbare Wärme beträgt ca. 80 kWh pro Jahr. Die Werte für die speicherbare Abwärme im Sommer sind wie schon erwähnt ca. 30% tiefer.

Im Bild 5 sind die monatlichen Beiträge der verschiedenen Wärmequellen ersichtlich. Bild 6 zeigt dasselbe für die Kälteerzeugung.

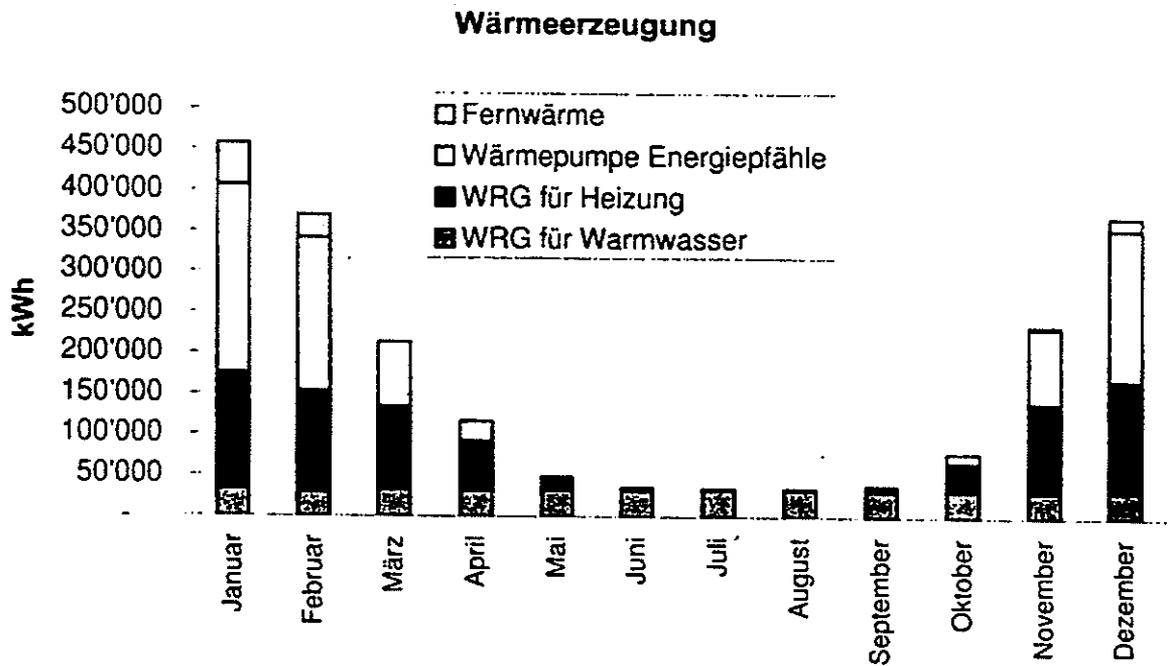


Bild 5: Die Grundlast wird mit interner Abwärme gedeckt. Die Energiepfähle decken den grössten Teil des verbleibenden Wärmebedarfes, die Spitzen werden mit Fernwärme gedeckt.

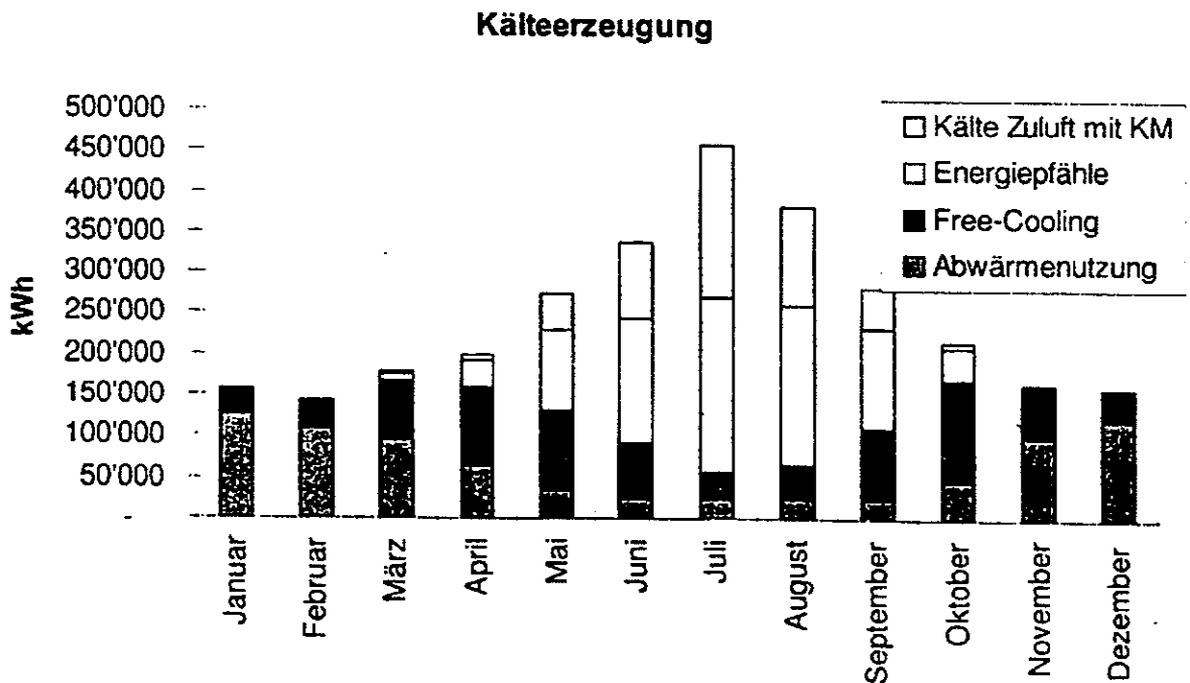


Bild 6: Die intern anfallende Abwärme wird primär für Wärmerückgewinnung genutzt oder bei kühler Witterung direkt an die Aussenluft abgeführt (Free-Cooling). Bei warmer Witterung wird über die Energiepfähle gekühlt. Zudem ist dann konventionell erzeugte Kälte für die Zuluftkühlung auf 17° C erforderlich.

4. Erkenntnisse für die Praxis

Energiepfähle stellen ein relativ kostengünstiges Element dar, Wärme und Kälte aus dem Boden zu gewinnen. In unserem Fall, wo kein fließendes Grundwasser erwartet werden kann, ist eine sorgfältige Planung und die Ermöglichung einer ausgeglichenen Bilanz zwischen Wärmeentzug und Wärmeeintrag besonders wichtig. Dies zeigen nicht nur die Simulationsergebnisse, sondern auch die Erfahrungen bei realisierten Anlagen.

Neben den energietechnischen Problemen stellen sich bei Energiepfählen noch ganz andere Probleme. Der Bau von Energiepfählen, insbesondere in der hier vorgesehenen Technik aus Ortsbeton, ist noch weitgehend Neuland. Die meisten Unternehmer, aber auch Bauingenieure, kennen dieses System noch nicht. Die Details der Verlegung der Rohre, der Schutz vor Beschädigungen und der Zusammenführung bis zur Zentrale müssen genau überlegt werden. Auch die Fragen der Verantwortung, Haftung bei Defekten und Aufgabenzuordnung sind neu zu überdenken. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Bauingenieuren und Haustechnikern ist unumgänglich.

Mit den heutigen Simulationswerkzeugen kann ein hoher Stand an Planungssicherheit erreicht werden. Die Zusammenarbeit mit Hochschulen und Spezialisten garantiert dabei, dass neue Forschungsergebnisse und das spezialisierte Know-how dieser Institutionen in die Planung einfließen kann.

Die Planung neuer Systeme der Gebäudetechnik verlangen ein grosses Engagement der Planer und sind sehr aufwendig. Das Resultat lohnt diesen Aufwand, für den Planer mit der Genugtuung, etwas Wegweisendes geschaffen zu haben, für den Bauherrn mit tiefen Betriebskosten.

5. Literaturverzeichnis

- /1/ Schweizer Ingenieur und Architekt, Sonderheft Nr. 27/28, 1998, „Dock Midfield, Zürich Flughafen“, Redaktion SI+A, Zürich
- /2/ Koschenz, M., Weber, R., 1997, Kurzbericht thermische Simulationen Midfield, EMPA Dübendorf
- /3/ Pahud D., Fromentin A., 1998, Pieux échangeurs: outils de simulation, KWH - Energieforschung im Hochbau, Status-Seminar ETH Zürich
- /4/ Mützenberg S., Kempf Th., 1997, Hydrogeologische Grundlagen für geothermische Nutzung Dock Midfield, Dr. H. Jäckli AG Zürich
- /5/ Pahud D., Fromentin A., Hubbuch M., 1998, Zwischenbericht Response-Test Dock Midfield, im Auftrag des BFE Bern