

Nutzung des Untergrundes zur Kälteversorgung von Gebäuden – Ergebnisse aus dem EU-Projekt Soil-Cool

Thomas Schmidt¹⁾, Hans Müller-Steinhagen¹⁾²⁾³⁾

*¹⁾Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT),
Ein Forschungsinstitut der Steinbeis-Stiftung
Pfaffenwaldring 10, D-70550 Stuttgart
Tel.: 0711-685-3299, Fax: 0711-685-3242*

Email: schmidt@swt-stuttgart.de, Internet: www.swt-stuttgart.de

²⁾Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart

³⁾Institut für Technische Thermodynamik (ITT), DLR Stuttgart

1. Einleitung

Der Energieaufwand zur Kühlung von Bürogebäuden stieg in den vergangenen Jahren europaweit stetig an. Architektonische Gründe, wie großflächige Glasfassaden, hohe interne Wärmelasten durch IT-Equipment etc. und gestiegene Komfortansprüche, machen eine aktive Kühlung in vielen Bürogebäuden über weite Teile des Sommers notwendig. Herkömmliche Anlagen decken den Kältebedarf über elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen. Dies führt sowohl zu hohen Energiebedarfswerten solcher Gebäude, als auch zu hohen Lasten in den Stromversorgungsnetzen, die in den vergangenen Jahren bereits vielerorts zum zeitweisen Zusammenbruch dieser Netze geführt haben.

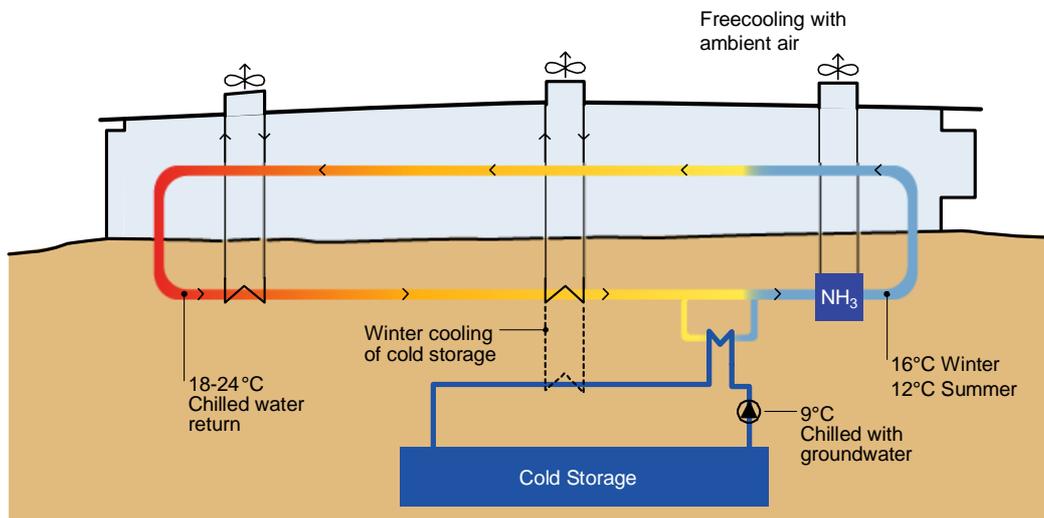


Bild 1: Konzept zur Kühlung des Danish Broadcast Headquarters in Kopenhagen (Quelle: COWI A/S, Dänemark)

In Verbindung mit modernen Gebäudekonzepten zur Reduzierung der Wärmelasten, die grundsätzlich oberste Priorität haben sollten, kann alternativ zu traditionellen Kälteanlagen der Kühlbedarf ökologisch und ökonomisch sinnvoll über die Nutzung natürlicher Kältequellen wie kühler Nachtluft und Untergrundkälte gedeckt werden.

Bei den Untergrundsystemen, siehe Beispiele in Bild 1, kann dabei entweder nur Kälte über Grundwasserbrunnen oder Erdwärmesonden entzogen werden, oder es wird verfügbare Kälte aus der Umgebung (Umgebungsluft, Oberflächenwasser ...) oder Abkälte z.B. aus Wärmepumpenverdampfern eingespeichert, um für eine spätere Nutzung verfügbar zu sein. Man spricht dabei von thermischen Untergrundspeichern (englisch: Underground Thermal Energy Storage, **UTES**).

Die Erfahrungen zeigen einerseits große energetische Einsparpotentiale durch solche Systeme, denen allerdings auch Risiken und Hindernisse wie eine mögliche Verockerung von Grundwasserbrunnen, regelungstechnische Schwierigkeiten oder aufwändige Genehmigungsprozeduren gegenüberstehen.

Im Projekt Soil-Cool, das aus dem EU-SAVE-Programm und dem Nordic Energy Research Programme gefördert wurde, tauschten sieben europäische Projektpartner ihre Erfahrungen mit dieser Technologie aus. Diese Partner sind COWI A/S - Dänemark, Hjeltnes COWI A/S – Norwegen, Interconsult ASA – Norwegen, Lund University – Schweden, SWT Solar- und Wärmetechnik Stuttgart – Deutschland, Vilnius Gediminas Technical University – Litauen und VTT Technical Research Centre of Finland – Finnland.

Ziel war die Erarbeitung von Grundlagendaten, Markt- und Einsparpotentialen sowie Projektierungsempfehlungen und die Identifizierung von möglichen Barrieren. Die Ergebnisse werden unter anderem in Form eines Planungsleitfadens, eines ausführlichen Handbuches und eines Auslegungswerkzeuges über das Internet verbreitet. Damit sollen Potentiale für diese Technik aufgezeigt und die Kenntnisse darüber verbreitet werden, um zukünftig eine vermehrte Umsetzung solcher Projekte anzustoßen. Die zweijährige Laufzeit des Projektes endete im Dezember 2004, die Ergebnisse stehen seit Frühjahr 2005 in englischer Sprache über www.cowi.dk zur Verfügung. Die Grafiken in diesem Beitrag sind den Projektdokumenten entnommen, die Beschriftungen sind aus diesem Grund ebenfalls in englischer Sprache.

2. Grundlagen

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag speicherseitig auf thermischen Aquifer- (**ATES**: Aquifer Thermal Energy Storage) und Erdsonden-Wärmespeichern (**BTES**: Borehole Thermal Energy Storage), aber auch Kavernen- (CTES) und Phasenwechsel-Speicher (z.B. Eis-Speicher) wurden berücksichtigt, siehe Bild 2.

Die umfangreichsten Erfahrungen liegen bislang in Schweden vor. In Malmö und Stockholm werden z.B. große Kältenetze über Aquifere mit bis zu 25 MW Kälteleistung versorgt. Außerdem werden seit einigen Jahren zahlreiche Umschaltstationen zur Telekommunikation und Sendeanlagen über Erdwärmesonden gekühlt, weil sich dies als die kostengünstigste und zuverlässigste Alternative erwiesen hat. Insgesamt sind in Schweden über 100 große Aquifer- und Erdwärmesondenanlagen in Betrieb.

Grundsätzlich kann jede Art von thermischer Energie im Untergrund gespeichert werden. Die Wahl der richtigen Speicher- und Systemkonzepte hängt von den geologischen Bedingungen am Standort und verschiedenen Randbedingungen auf der Bedarfsseite ab. Zur schnellen Beurteilung im frühen Projektstadium sind im

oben erwähnten Planungsleitfaden Entscheidungshilfen und Richtwerte zur Grobdimensionierung enthalten.

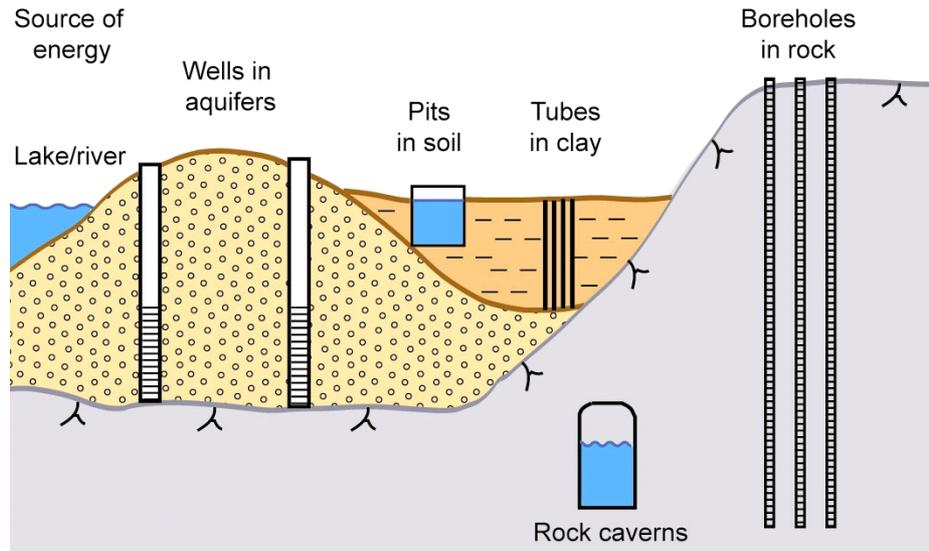


Bild 2: Möglichkeiten zur thermischen Energiespeicherung im Untergrund (Quelle: Universität Lund, Schweden)

Potentielle Anwendungsgebiete ergeben sich, unter Berücksichtigung verschiedener Klimata, beispielsweise in folgenden Bereichen:

- Komfort - Kühlung (Klimatisierung) von Büro-, Verwaltungs- und Wohngebäuden sowie Industriebauten
- Prozess - Kühlung in Industrie, Lebensmittelbranche, Telekommunikationssektor, IT-Einrichtungen und bei der Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung
- Lebensmittelkühlung und Qualitätssicherung
- Temperierung von Gewächshäusern zur Ertragssteigerung
- Kühlung in Fischfarmen
- etc.

Die Anwendungsgebiete haben unterschiedliche Temperaturanforderungen an die jeweiligen Kühlprozesse. Für die Gebäudeklimatisierung liegen Kühltemperaturen üblicherweise zwischen +6 und +15 °C, in den anderen Anwendungsgebieten oft in ähnlichen Bereichen oder höher. Mit Aquiferen lassen sich problemlos Temperaturen hinunter bis 4-5 °C erreichen, mit Erdwärmesonden können theoretisch sogar Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes erreicht werden. Die Systeme sind allerdings umso effizienter, je höher die Kühltemperaturen liegen.

Aus diesem Grund sind auch für eine sinnvolle Einbindung von Untergrund-Kältespeichern geeignete Verteilsysteme auf der Anwendungsseite eine wichtige Voraussetzung. Diese müssen auf eine Wärmeübertragung bei niedrigen Temperaturdifferenzen ausgelegt sein, um speicherseitig möglichst hohe Vorlauftemperaturen zu erlauben. Im Gebäudesektor sind deshalb zur Kühlung Hochtemperatur-Kälte-Verteilsysteme, bei Einbindung einer Heizungsunterstützung über eine Wärmepumpe

Niedertemperatur-Heiz-Verteilsysteme erforderlich. Dies muss bereits in einem frühen Projektstadium in die Gebäudeplanung aufgenommen werden.

3. Vor- und Nachteile von UTES-Systemen

Die Nutzung des Untergrundes zur Kühlung bietet bedeutende Vorteile im Vergleich zu konventionellen Kälteanlagen. Daneben gibt es auch einige Beschränkungen, die bei der Planung einer solchen Anlage berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden sind einige dieser Vorteile und Beschränkungen aufgelistet:

Energieeinsparung:

- Die Erfahrung zeigt, dass bis zu 100 % des Kühlbedarfs über natürliche Quellen in Verbindung mit UTES-Systemen gedeckt werden können. Dies entspricht einer Stromeinsparung von ungefähr 70-85 % im Vergleich zu konventionellen Kälteanlagen.
- Wärmepumpen (elektrisch oder thermisch angetrieben) können in Verbindung mit UTES genutzt werden, um sowohl den Kälte- als auch den Wärmebedarf zu decken. Die Energieeinsparungen liegen in diesem Fall noch deutlich höher.

Umweltbelastungen

- Die Stromeinsparung führt zu geringeren Umweltbelastungen durch verringerte Emission von Schadstoffen wie CO₂, SO_x, NO_x usw., die zum Treibhauseffekt, saurem Regen und der Zerstörung der Ozonschicht beitragen.

Wirtschaftlichkeit

- Die Amortisationszeiten sind normalerweise sehr attraktiv und liegen oft in Bereichen unter fünf Jahren. Selbst bei höheren Amortisationszeiten liefert eine Bewertung der Lebenszykluskosten in der Regel positive Ergebnisse, da die Systeme, speziell bei Erdwärmesonden, eine sehr hohe Lebensdauer haben und darum Einsparungen über viele Jahre liefern.
- Durch eine sorgfältige Analyse des tatsächlichen Bedarfs können die Investitionskosten unter denen einer traditionellen (häufig überdimensionierten) Kälteanlage liegen.

Ästhetik und Lärm

- Die geräuschlose Betriebsweise und ästhetische Überlegenheit der unsichtbaren UTES-Systeme werden normalerweise sehr geschätzt.

Gesundheitsaspekte

- Das Legionellenrisiko ist ausgeschlossen, da die Untergrund-Kreisläufe geschlossen und von den Verteilsystemen getrennt sind. Folglich können keine Aerosole in der Luft gebildet werden, die in traditionellen Systemen mit Kühltürmen entstehen können.

Einschränkungen und Randbedingungen, die bei der Entscheidung für ein UTES-System berücksichtigt werden sollten sind:

- **ATES-Systeme** sind nicht so problemlos umzusetzen wie BTES-Systeme. Sie

benötigen sorgfältige Voruntersuchungen und einen höheren Wartungsaufwand während des Betriebes. Bei geeigneten Randbedingungen sind die Amortisationszeiten in der Regel kurz (üblicherweise 2-5 Jahre). ATES-Systeme können nicht an jedem Standort errichtet werden und erfordern manchmal ausgiebige Voruntersuchungen, die bereits in einem frühen Projektstatus eingeplant und finanziert werden müssen. Daneben kann der Genehmigungsprozess komplex und zeitaufwändig sein, wenn es sich um die erste Anlage dieser Art in der Umgebung handelt. Auflagen hinsichtlich Grundwasser- und Umweltschutz können die Möglichkeiten einschränken. Einige ATES-Systeme haben Probleme während des Betriebs gezeigt. Die meisten davon können mit einfachen Maßnahmen verhindert werden. Ein häufiges Problem ist beispielsweise eine Verockerung der Grundwasserbrunnen. Dies kann in den meisten Fällen durch eine sorgfältige Brunnen- und Systemplanung vermieden werden.

- **BTES-Systeme** sind einfacher herzustellen und wartungsärmer zu betreiben. Daneben haben sie eine beeindruckend lange Lebensdauer. Weiterhin erfordern BTES-Systeme normalerweise nur einfache Genehmigungsprozesse. Dafür sind Amortisationszeiten wegen der höheren Investitionskosten für die Bohrungen und die Erdwärmesonden häufig deutlich länger als bei ATES-Systemen (6-10 Jahre). Gelegentlich werden zudem weitere Kältequellen zur Spitzenlastdeckung benötigt.

4. Typische Systemkonfigurationen

Bild 3 zeigt die in Europa am häufigsten eingesetzten ATES-Systemkonfigurationen. Eine der vier dargestellten Varianten ist eine reine Kühlanwendung (D), zwei sind kombinierte Heiz- und Kühlanwendungen (A und B), die vierte ist eine reine Heizanwendung (C).

Ein Aquifer-Wärme- bzw. -Kältespeicher besteht aus zwei Grundwasserbrunnen (oder zwei Brunnengruppen), die in die Aquiferschicht reichen und einen direkten Austausch des Grundwassers erlauben. Während der Heizperiode wird aus dem warmen Brunnen Wasser gefördert, direkt oder über eine Wärmepumpe abgekühlt und über den kalten Brunnen wieder in den Untergrund eingeleitet. Während der Kühlperiode wird die Strömungsrichtung umgekehrt: Kaltes Grundwasser wird dem kalten Brunnen entnommen, erwärmt und in die warme Bohrung injiziert.

Bild 4 zeigt Systeme für eine Anwendung mit Erdwärmesonden. Links (A) ist eine kombinierte Heiz- und Kühlanwendung dargestellt, rechts (B) eine reine Kühlanwendung.

Ein Erdsonden-Wärme- bzw. -Kältespeicher ist gekennzeichnet durch den Wärmetransport durch Wärmeleitung von den Bohrlöchern an das umgebende Erdreich hin und umgekehrt. Die Bohrlöcher können mit verschiedenen Typen von Erdwärmesonden ausgestattet sein und verwandeln ein oder mehrere Bohrlöcher in einen großen Wärmeübertrager zwischen Wärmeträgerfluid und Erdreich. Die gebräuchlichsten Erdwärmesonden sind Einfach- und Doppel-U-Rohr-Sonden aus Kunststoff, als Wärmeträgerfluid kommt entweder Wasser oder eine Mischung aus Wasser und Glykol zum Einsatz, um auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu ermöglichen.

Als Bohrlochverfüllung kommt in Skandinavien häufig reines Wasser zum Einsatz, wenn sich das Bohrloch in Fels befindet. Ansonsten wird das Bohrloch üblicherweise mit einer Suspension aus Bentonit, Quarzsand, Zement und Wasser, oder einer speziell hierfür entwickelten Mischung, die für eine möglichst gute thermische Ankoppelung der Sondenrohre an die Bohrlochwand sorgen soll, verpresst. Die Wärmeübertragung an das und vom Erdreich erfolgt über das Wärmeträgerfluid, das in den Erdwärmesonden zirkuliert.

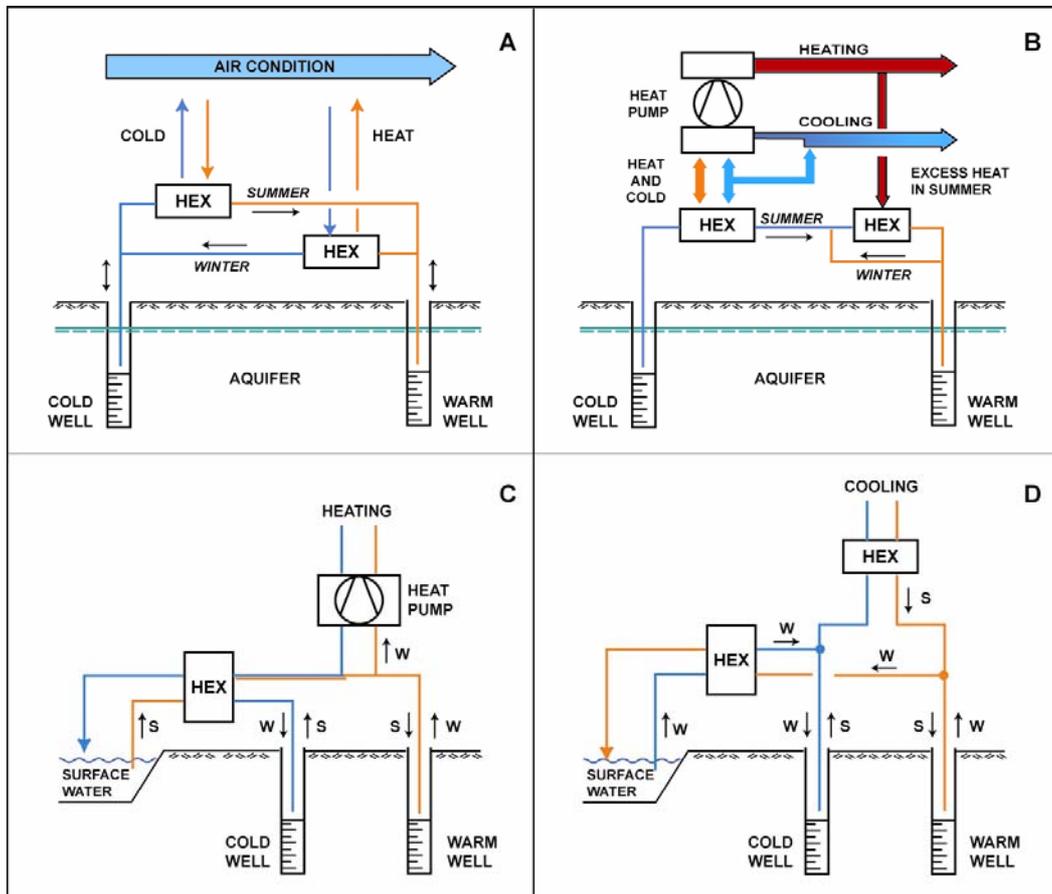


Bild 3: ATE-Systeme in Europa (Quelle: Universität Lund, Schweden)

Prinzipiell unterscheidet man bei beiden Speicherarten passive und aktive Systeme. Als passiv werden diejenigen Anlagen bezeichnet, die Kälte lediglich aus dem Untergrund entnehmen. Im Gegensatz dazu wird in aktiven Anlagen die Kälte aktiv in den Untergrund eingespeichert, um sie zu einem späteren Zeitpunkt wieder zu entnehmen. Erstere müssen so dimensioniert sein, dass auch im mehrjährigen Betrieb eine natürliche Regeneration des Untergrundes möglich ist. Bei den aktiven Systemen wird beispielsweise bei niedrigen Außentemperaturen Kälte aus der Außenluft oder aus Oberflächengewässern entzogen und diese im Untergrund eingespeichert.

Am weitesten verbreitet sind Systeme, in die eine Wärmepumpe integriert ist. Hier wird die am Verdampfer anfallende Kälte während des Heizbetriebes als Kältequelle genutzt. Während des Kühlbetriebes wird vorwiegend direkt mit Untergrundkälte gekühlt, Lastspitzen können bei geeigneter Verschaltung ebenfalls mit Hilfe der

Wärmepumpe gedeckt werden. Die dabei anfallende Abwärme am Kondensator wird wieder im Untergrund eingespeichert und in der Heizperiode als Wärmequelle genutzt. Diese Systeme werden häufig für eine Voldeckung des Kältebedarfs ausgelegt, heizungsseitig werden in der Regel 50 % der Last und etwa 70-80 % des Wärmebedarfs gedeckt. Die System-Arbeitszahlen liegen in der Regel zwischen 5 und 7 für die kombinierte Wärme- und Kälteversorgung, für die Kälteseite alleine werden oft Arbeitszahlen von 30-40 erreicht.

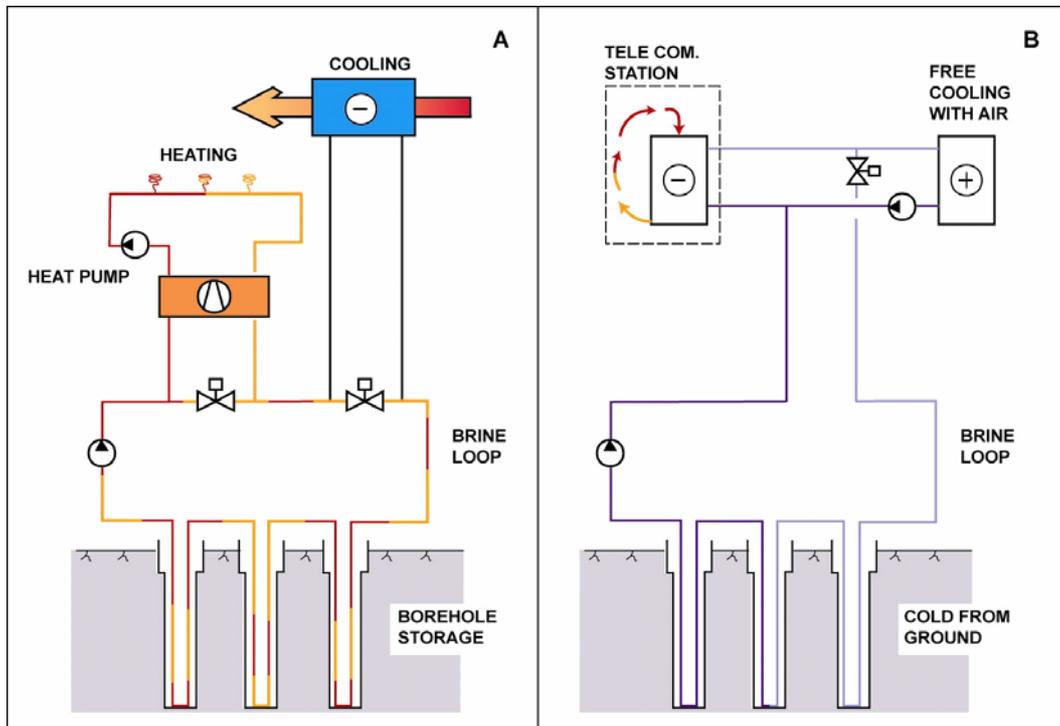


Bild 4: BTES-Systeme in Europa (Quelle: Universität Lund, Schweden)

5. Richtwerte

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind einige Richtwerte für Aquifer- und Erdsonden-Wärme- bzw. -Kältespeicher zusammengestellt. Sie können für erste Abschätzungen dienen, ersetzen jedoch keineswegs eine konkrete Planung im Ausführungsfall. Weitere Angaben zu Planung und Ausführung können z.B. [1] entnommen werden.

Für eine genauere Berechnung der Temperaturverhältnisse im Untergrund sowie von Fördertemperaturen steht eine Vielzahl von Simulationsprogrammen zur Verfügung. Eine Sichtung verschiedener Programme hat eine gute Eignung des Programms EED [2] für die Planung von Erdwärmesondenanlagen gezeigt, da der Einfluss der Last auf die Untergrundverhältnisse in geeigneter Weise berücksichtigt werden kann und das Programm relativ einfach zu bedienen ist. Für Aquifer-Wärmespeicheranlagen stand ein vergleichbares Programm zu Projektbeginn nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde ein Simulationstool mit dem Namen TRNATES [3] entwickelt, das auf dem Softwarepaket TRNSYS [4] basiert, jedoch keine tiefgehenden Kenntnisse dieser Simulationssoftware erfordert.

Tabelle 1: Richtwerte zu Aquifer-Wärme- und Kältespeichern (Quelle: Universität Lund, Schweden)

Förder-Durchfluss pro Brunnen (m ³ /h)	20 -100	Leistung pro Brunnen bei 50 m ³ /h und Delta T = 10°C (kW)	582
Injektions-Durchfluss pro Brunnen (m ³ /h)	15 - 75	Min. / max. Injektionstemperatur (°C)	3 / 30
Bohrloch-Durchmesser (Zoll)	8 - 24	Transmissivität* des Aquifers (m ² /s)	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴
Bohrloch-Tiefe (m)	10 -100	Typische Arbeitszahlen (Kühlung)	30 - 50
Abstand zwischen Brunnen in Brunnengruppen (m)	10 - 50	Typische Kosten des Aquifer-Speichers (€/kW)	100 - 200

* Die Transmissivität (m²/s) ist definiert als hydr. Leitfähigkeit (m/s) mal Mächtigkeit des Aquifers

Tabelle 2: Richtwerte zu Erdsonden-Wärme- und Kältespeichern (Quelle: Universität Lund, Schweden)

Bohrloch-Durchmesser (Zoll)	4 - 6	Leistung der Erdwärmesonden (W/m)	20 - 30
Bohrloch-Tiefe (m)	20 -200	Min./max. Eintrittstemperatur (°C)	-5 / > +70
Abstand zwischen Bohrlöchern (m)	4 -12	Typische Arbeitszahlen (Kühlung)	20 - 30
Wärmeleitfähigkeit Erdreich (W/mK)	2 - 4	Typische Kosten des Erdsondenfeldes (€/m)	25 - 35
Durchfluss in Sonden (m/s)	0,5 -1,0	Glykolanteil Fluid (%)	20 - 30

6. Schlussbemerkung

Im beschriebenen Projekt Soil-Cool konnten wertvolle Erfahrungen zu Einsparpotentials, Planung, Bau und Betrieb von thermischen Untergrundspeichern zur Kälteversorgung erarbeitet und zusammengestellt werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse stellen nur eine kurze Zusammenfassung der gesammelten Informationen dar. Die vollständige Projektdokumentation kann unter www.cowi.dk kostenfrei heruntergeladen werden.

7. Literatur

- [1] VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [2] EED - Earth Energy Designer V 2.0, Blocon Sweden, www.buildingphysics.com, 2000
- [3] TRNATES – ATEs Simulation using TRNSYS, Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT), info@swt-stuttgart.de, 2004
- [4] TRNSYS – A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory; University of Wisconsin – Madison, 2000

Das Projekt Soi-ICool/Rekyl wurde mit Mitteln aus dem SAVE Programm der Europäischen Union und aus dem Nordic Energy Research Programme gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.