

Impacto del agua subterránea en los sistemas geotérmicos

ROLF KATZENBACH (*) y ISABEL M. WAGNER (**)

RESUMEN El comportamiento térmico de los sistemas geotérmicos está influido por la presencia y la velocidad del agua subterránea. El impacto debe ser tenido en cuenta tanto durante el dimensionamiento como durante la construcción. Se demuestra que el impacto de la interferencia con instalaciones vecinas tiene que ser controlado, especialmente en caso de una corriente del agua subterránea.

GROUNDWATER IMPACT ON GEOTHERMAL SYSTEMS

ABSTRACT *The thermal behavior of geothermal systems is influenced by the presence and the velocity of the groundwater. The impact has to be accounted for during the dimensioning as well as during the construction. It is shown that the impact on the interference with neighbored installations has to be controlled, especially in case of groundwater flow.*

Palabras clave: Impacto del agua subterránea, Comportamiento térmico de sondas geotérmicas, Influencia térmica del suelo, Interferencia térmica entre sondas, 3D cálculos de elementos finitos.

Keywords: Impact of the ground water, Thermal behavior of borehole heat exchangers, Thermal influence of the soil, Thermal interference between BHE, 3D finite element calculations.

1. INTRODUCCIÓN

El número de los sistemas geotérmicos superficiales en uso aumenta rápidamente a causa de los numerosos proyectos geotérmicos que fueron realizados con éxito. El factor determinante para la instalación de los sistemas geotérmicos superficiales y para el auge de las plantas geotérmicas, es principalmente la aceptación social, la cual está influida fundamentalmente por la rentabilidad.

La calidad y la eficiencia son decisivas para la rentabilidad de las instalaciones geotérmicas. Por eso es necesario que la comprobación de la calidad de los sistemas incluya el aseguramiento tanto de la calidad de la construcción, como del dimensionamiento. El objetivo de la comprobación de la calidad es la prevención de efectos desfavorables en el agua subterránea y en el suelo, el aseguramiento del funcionamiento con poco mantenimiento y la eficiencia máxima de la instalación geotérmica.

La rentabilidad de estos sistemas depende del comportamiento térmico y de la temperatura del suelo. Una planta geotérmica usada para calentar un edificio sustrae calor del suelo y baja la temperatura del suelo en la zona alrededor de la sonda. En el caso contrario, una marcha para enfriar un edificio aporta calor al suelo, lo que implica un aumento de su temperatura. El tamaño de estas zonas de influencia térmica y el grado de influencia depende de las características del suelo como conductividad y capacidad térmica así como de presencia de corrientes de agua subterránea. El agua subterránea influye en el dimensionamiento, la construcción y el funcionamiento de los sistemas.

La sonda geotérmica es el sistema más usado en Alemania. Por ese motivo se hará aquí hincapié en estos sistemas. Me-

dante esta publicación los autores quieren enseñar la importancia de la consideración del transporte de energía por convección por los sistemas geotérmicos verticales y la dependencia de la velocidad del agua subterránea.

2. TRANSPORTE DE ENERGÍA EN EL SUELO

La mayor parte del transporte de energía se realiza por mecanismos de conducción y convección. El transporte energético en el suelo está descrito por la siguiente ecuación:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - (\rho \cdot c)_w \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + D_\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q}_i = p \cdot c \frac{\partial T}{\partial t}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{conducción}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{convección}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{dispersión}}$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{fuentes de calor}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{cambio de calor temporal}}$

$$p \cdot c = n(p \cdot c)_w + (1 - n)(p \cdot c)_s$$

λ conductividad térmica del suelo [W/(m·K)].
 D_λ coeficiente de dispersión del suelo [W/(m·K)].
 T temperatura del suelo [K].
 v velocidad del agua subterránea [m/s].
 \dot{Q}_i fuentes de calor [W/m³].
 t tiempo [s].
 ρ densidad [kg/m³].
 c capacidad específica del suelo [J/(kg·K)].
 $\rho \cdot c$ capacidad volumétrica del suelo [J/(m³·K)].
 n porosidad [-].
 $(\rho \cdot c)_w$ capacidad volumétrica del agua subterránea [J/(m³·K)].
 $(\rho \cdot c)_s$ capacidad volumétrica de las partículas sólidas [J/(m³·K)].

(*) Prof. Dr.-Ing. Instituto y Laboratorio de Geotecnia, TU Darmstadt, Alemania.

(**) Dipl.-Ing. Instituto y Laboratorio de Geotecnia, TU Darmstadt, Alemania.

Una visión de conjunto más detallada de los procesos termodinámicos se puede consultar en las referencias bibliográficas (Bear 1972, Nield et al. 1999).

Si las condiciones del suelo indican que no hay una corriente del agua freática o que se espera solamente una corriente pequeña, el transporte energético por conducción es dominante. La existencia del agua subterránea estacionaria aumenta la conductividad térmica λ del suelo. Sin embargo, si existe una corriente grande del agua freática el transporte de energía está causado decisivamente por convección, que depende de la velocidad v y de la capacidad térmica del agua subterránea (véase el segundo término de la fórmula anterior).

3. LA CONSIDERACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA DURANTE EL DIMENSIONAMIENTO

La rentabilidad del sistema depende de la calidad (perdurabilidad) del material tanto como del funcionamiento óptimo, que a su vez requiere un dimensionamiento detallado y cuidadoso.

La evaluación del impacto del agua subterránea en el sistema depende del funcionamiento de las sondas geotérmicas: con miras a un sistema de extracción del calor, la presencia del agua subterránea permite una aceleración de la regeneración térmica del subsuelo porque aporta el calor por convección al lugar de extracción a causa de la gran capacidad térmica del agua. El mismo fenómeno se observa para sistemas de inyección de calor al terreno, el agua freática nivela la alta temperatura del suelo. Por ese motivo, el no considerar el flujo de agua está del lado conservador en los cálculos para sistemas de extracción o de inyección de calor. Sin embargo, la consideración del flujo de agua y con ello la regeneración térmica del suelo puede redundar en un sistema más económico. El agua subterránea tiene diversos impactos en el funcionamiento de las sondas geotérmicas: en la longitud y el número de las sondas y en la interacción entre ellas. No obstante, para el funcionamiento del almacén térmico (van Meurs 1986) es indispensable una velocidad del agua subterránea menor de 0,05m/d (equivalente a $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s) porque una corriente mayor sustrae el calor del almacén. La falta de consideración del flujo del agua subterránea resulta desfavorable para el sistema.

El dimensionamiento de las sondas geotérmicas en Alemania se puede realizar –en función del tamaño de la planta y el grado de exactitud– por ejemplo, mediante los siguientes procedimientos:

- Dimensionamiento mediante la guía alemana VDI 4640 (mediante la potencia promedio de extracción).
- Dimensionamiento con los programas analíticos como EED y EWS etc.
- Modelación con programas numéricos como FEFLOW (Finite Element Subsurface FLOW System) etc.

Para obtener en Alemania el permiso de construcción de los sistemas grandes, con una carga mayor de 30 kW, es usual la presentación de un dimensionamiento detallado para descartar un impacto térmico al terreno de los vecinos. El descenso máximo permitido de la temperatura del suelo depende de lo decidido por la agencia de Gobierno.

En el caso de las plantas geotérmicas pequeñas con una carga menor a 30 kW, que también afectan en una distancia menor al terreno vecino (normalmente una distancia de 5–6 m) una investigación tan intensiva no es obligatoria (véase capítulo 4). Además, para estos proyectos pequeños la inversión en un dimensionamiento detallado muchas veces no parece razonable por sus costes. Sin embargo, es recomendable, ya que los parámetros térmicos o una corriente del agua subterránea diferentes a los supuestos tienen impacto en el desempeño del sistema, como se presenta en este capítulo, y finalmente en su rentabilidad.

Habitualmente para proyectos pequeños de extracción o aporte de calor con una carga menor a 30 kW, se acostumbra una estimación de los parámetros térmicos. En este caso las sondas están dimensionadas mediante los valores de la potencia promedio de extracción mencionados en la guía Alemana VDI 4640.

Adicionalmente en muchos casos los programas analíticos también son aplicados. Por ejemplo el programa Earth Energy Designer (EED) es usado a nivel mundial y permite el dimensionamiento de instalaciones geotérmicas compuestas por varias sondas en base a las llamadas “g-funciones”. Si no existen informaciones detalladas sobre los parámetros térmicos del suelo el programa ofrece el uso de los parámetros listados en el VDI 4640. La presencia del agua freática está considerada por medio de la utilización de una conductividad térmica más alta del suelo saturado en comparación con el suelo seco. Sin embargo el efecto de la corriente del agua freática no es tenido en cuenta ni en la guía VDI 4640 ni en los mencionados programas analíticos.

Una modelación con programas numéricos basándose en una combinación del transporte de calor y la corriente del agua permite un dimensionamiento detallado y la consideración del flujo del agua freática. Los cálculos con los elementos finitos son muy usados para investigaciones sobre el comportamiento térmico al largo plazo, la influencia del agua freática, la influencia térmica entre las sondas y la influencia térmica a los vecinos a causa del funcionamiento de la sonda.

La guía alemana VDI 4640 establece una disminución máxima de la temperatura del suelo de 11 K promedio mensual (VDI, 2001). Considerando una temperatura natural del suelo de 10°C y una diferencia de 3 K entre entrada y salida del fluido, resulta que su temperatura media no debe quedar por debajo de 0,5°C.

Una simulación numérica de una instalación de 5 kW con una sonda de longitud $L = 80$ m (potencia específica de 62,5 W/m) en arena saturada (véase tabla 1), cumpliendo la temperatura mínima de 0,5°C sirve de ilustración sobre el impacto de la corriente del agua subterránea que varía entre 0m/s, $1 \cdot 10^{-7}$ m/s y $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Un acuífero existente a lo largo de la longitud de la sonda (80 m) es un caso extremo y no existe con frecuencia. Sin embargo este ejemplo refleja el impacto máximo del flujo del agua subterránea que circula desde la izquierda a la derecha en el modelo. El modelo, con una temperatura natural del suelo de 10°C, tiene una dimensión de 150x300 m y una altura de 150 m. La sonda está localizada a una distancia de 75 m de la frontera izquierda del modelo. Las figuras 1-4 muestran el impacto de la temperatura del suelo, resultando más baja en la mitad de la sonda horizontal, en el perfil del modelo en 3D, des-

Tipo del suelo	Conductividad térmica λ [W/mK]	Capacidad térmica c [J/m³K]	Conductividad k_f [m/s]	Porosidad n [-]
Arena saturada	2,4	2,5	$1 \cdot 10^{-4}$	0,35
Arcilla saturada	1,4	1,9	$1 \cdot 10^{-8}$	0,5

TABLA 1. Propiedades térmicas del suelo usado en la investigación.

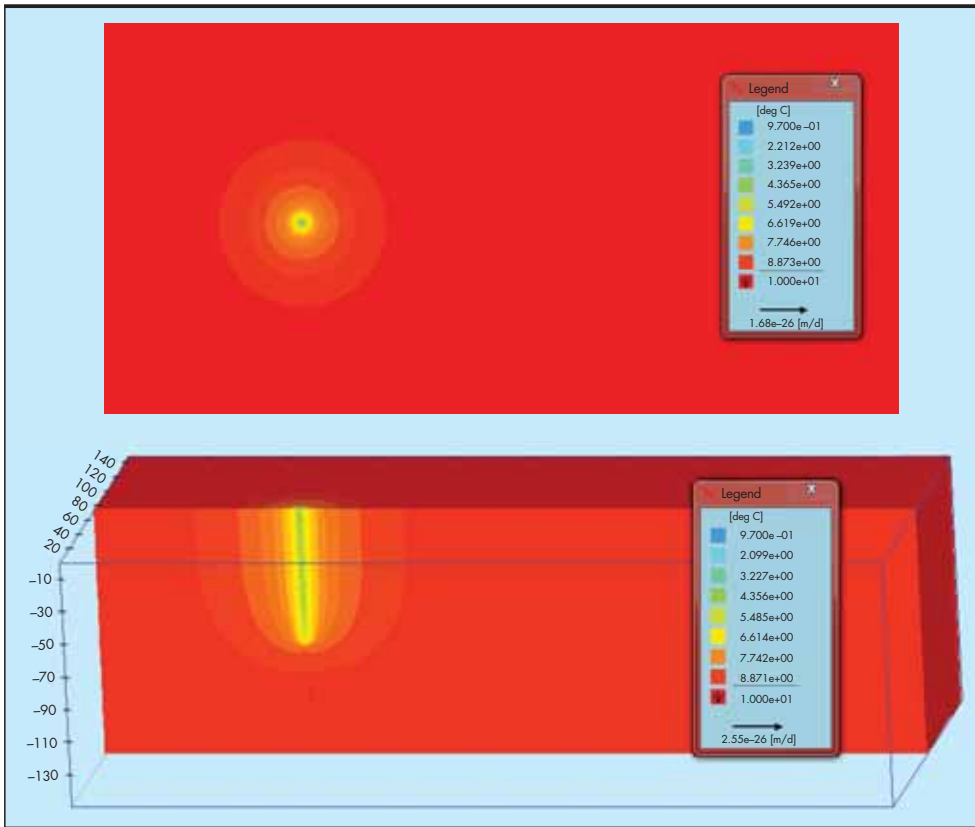


FIGURA 1. Temperatura del suelo de una sonda de extracción de 80 m en planta y en perfil, arena saturada sin flujo de agua freática (0 m/s) después de 20 años (en invierno).

pués de 20 años y en diversos puntos de observación a lo largo de 20 años (7.300 días). Se muestra la temperatura en la mitad de la sonda a una profundidad de 40 m.

La necesidad de una simulación numérica del comportamiento térmico a largo plazo es demostrada en las figuras 2 y

4. En la simulación de la sonda sin flujo de agua freática (0 m/s), la temperatura mínima no se alcanza dentro de los primeros 20 años (figura 2) sino que tarda más de 50 años. Esto demuestra que una regeneración térmica del suelo debería ser proporcionada, por ejemplo mediante un funciona-

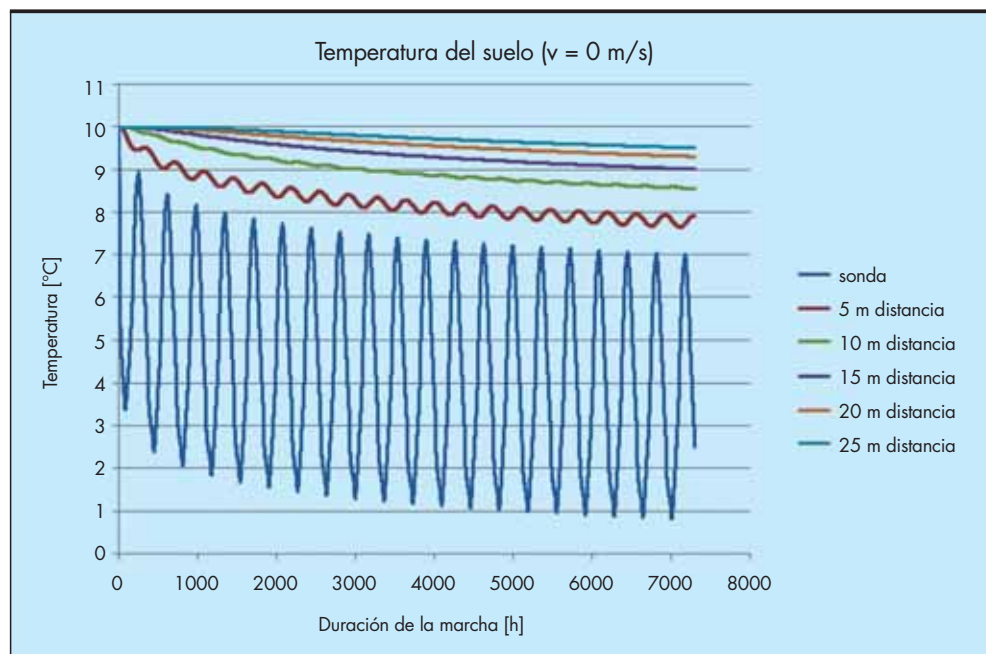


FIGURA 2. Temperatura del suelo en los puntos de observación de una sonda de extracción de 80 m, arena saturada sin flujo de agua freática (0 m/s).

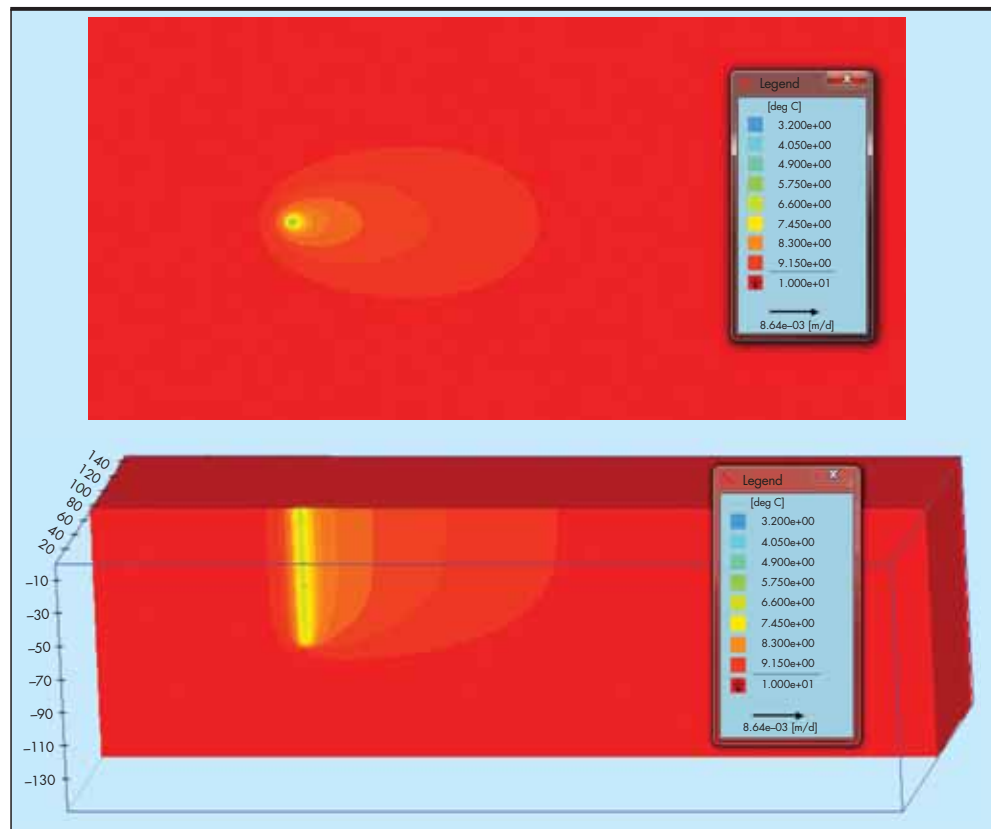


FIGURA 3. Temperatura del suelo de una sonda de extracción de 80 m en planta y en perfil, arena saturada con un flujo de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (0,0086 m/d) después de 20 años (en invierno).

miento de refrigeración del edificio en verano, para evitar un enfriamiento inadmisibles del suelo.

Con un flujo de $1 \cdot 10^{-7}$ (equivalente a 0,0086 m/d) la temperatura mínima es conseguida después de aproximadamente 12 años (figura 4). Cálculos numéricos adicionales verifican que

la temperatura mínima se obtiene dentro de 1 año si hay una corriente de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (equivalente a 0,086 m/d), figura 5. Para considerar el efecto del agua freática, el comportamiento a largo plazo debe ser tenido en cuenta, especialmente para sistemas sin o con poca corriente.

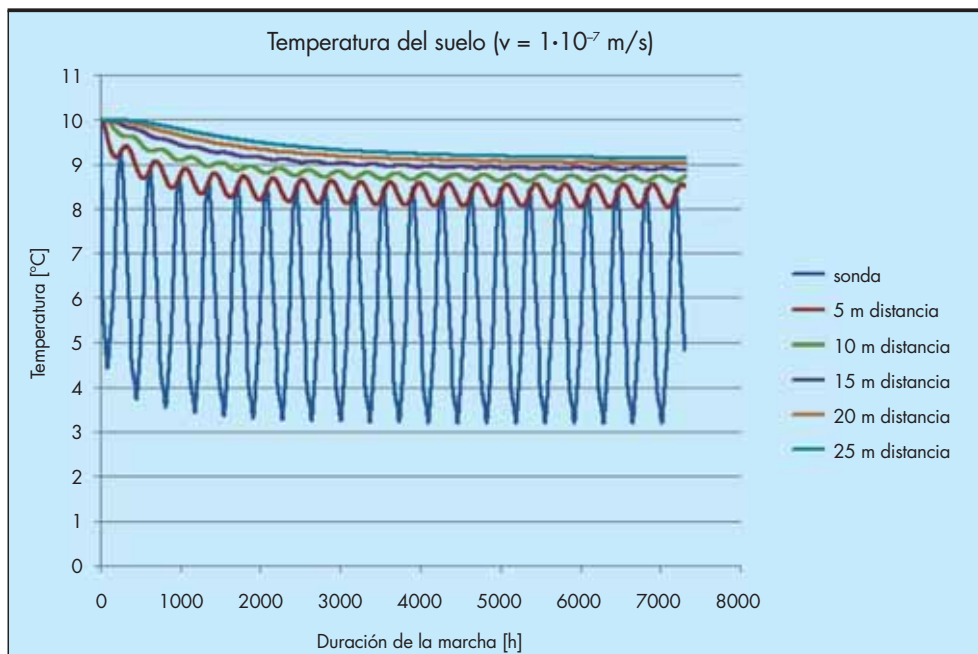


FIGURA 4. Temperatura del suelo en los puntos de observación de una sonda de extracción de 80 m, arena saturada con un flujo de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (0,0086 m/d).

De los cálculos numéricos resulta que después de 20 años un cambio de la corriente del agua freática de 0 m/s a $1 \cdot 10^{-7}$ m/s causa un aumento de la temperatura del suelo en la zona de la sonda de 0,9°C a 3,2°C, que es un mejoramiento del 24% en relación a la reducción de la temperatura del suelo de 9,1 K (10°C–0,9°C). Para un punto de observación a una distancia de 10 m, distancia mínima entre las sondas vecinas (véase capítulo 4), se observa un aumento de la temperatura mínima de 0,3 K: sin corriente de agua se obtiene 8,6°C, y con una corriente de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, 8,7°C. Este mejoramiento es equivalente a 7% en relación a una reducción de la temperatura del suelo de 1,4 K (10°C–8,6°C). Se verifica por los resultados del cálculo con un flujo de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (figura 4) que los primeros 3 puntos de observación (sonda, 5 m y 10 m distancia) sufren una reducción menor de la temperatura mínima del suelo, pero se observan también oscilaciones más acusadas por el funcionamiento temporal en comparación con el cálculo de 0 m/s (figura 2). Sin embargo, lo contrario reflejan los puntos de observación de 15 m, 20 m y 25 m de distancia. Aquí resultan temperaturas más bajas en el cálculo con un flujo de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (9,2°C a una distancia de 25 m) en comparación con el cálculo de 0 m/s (9,6°C a una distancia de 25 m) a causa del mayor espaciamiento de la influencia térmica con un flujo mayor. El impacto de la corriente del agua subterránea se determina en función de la posición, de la corriente y del tipo del suelo. Una corriente mayor es positiva para la regeneración del suelo en la zona de la sonda y proximidades, y por eso para los costes de la sonda; pero a la vez es negativo para las instalaciones más alejadas de la sonda que resultan más afectadas.

Examinando los resultados del cálculo con un flujo de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (0,086 m/d) se comprueba una mejora en la disminución de la temperatura en todos los puntos de observación (véase figura 5). En la zona de la sonda se obtiene una mejora del 74% (7,6°C con corriente, frente a 0,9°C sin corriente) y en una distancia de 10 m 57% (9,4°C con corriente, frente a 8,6°C sin corriente). Los puntos a una distancia de 15, 20 y 25 m también reflejan un aumento de la temperatura.

Como la disminución de la temperatura del suelo es menor por el flujo del agua freática, se podría reducir la longitud de

las sondas atendiendo a la diferencia máxima. En la figura 6, a base del mismo modelo de arena saturada presentado antes, la longitud mínima para cumplir los 0,5°C en la zona de la sonda está calculada para el caso de una corriente de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Una sonda de 60 m de longitud cumple con la temperatura mínima, lo que significa una reducción de la longitud de la sonda de 20 m (80 m a 60 m) gracias a una velocidad del agua subterránea de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s – lo cual es 25% de la longitud. Para la potencia específica el incremento de la convección por la corriente del agua freática significa una mejora de 62,5 W/m a 83 W/m (potencia de 5 kW y una longitud de 60 m). Así se demuestra que el dimensionamiento de las sondas es más económico si se considera el flujo del agua subterránea.

Además durante el dimensionamiento se debe considerar la localización de las instalaciones con respecto a la dirección de la corriente del agua. En el caso de una planta de extracción o aporte de calor la disposición de las sondas, y respectivos pilotes, no debería ser compacta sino estrecha, de forma lineal. Una eficiencia máxima se alcanza si la línea de las sondas o pilotes se dispone ortogonalmente a la corriente del agua, asegurando una extracción óptima de energía y evitando interacciones entre las sondas. En el caso del almacén térmico, que implica una formación compacta, la corriente de agua subterránea tiene una influencia negativa y esto debe ser considerado durante el dimensionamiento.

4. IMPACTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LOS SISTEMAS VECINOS

Para la consideración del impacto térmico de los sistemas geotérmicos vecinos deben estar disponibles todas informaciones sobre las instalaciones. En caso de plantas pequeñas en Alemania se asume que no tienen un impacto en los sistemas vecinos si cada sonda se sitúa a más de 5–6 m de distancia del límite del terreno. De esto resulta una distancia mínima entre instalaciones geotérmicas vecinas de 10 m. Sin embargo, si existe un flujo de agua subterránea es imprescindible predefinir una distancia obligada para evitar una influencia térmica que dependerá de la magnitud de la corriente.

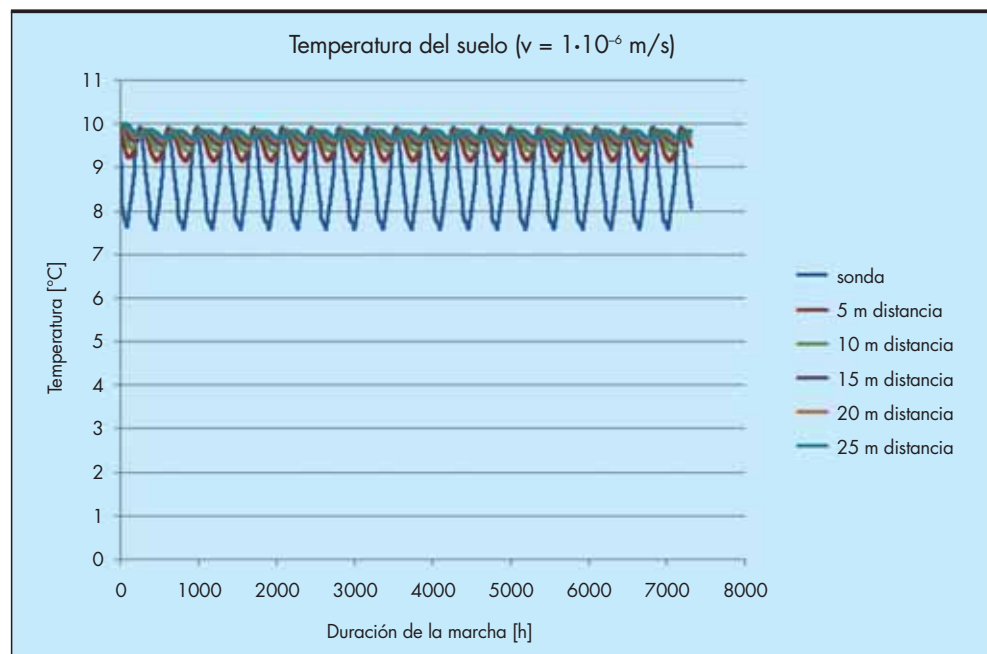


FIGURA 5. Temperatura del suelo en los puntos de observación de una sonda de extracción de 80 m, arena saturada con un flujo de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (0,086 m/d).

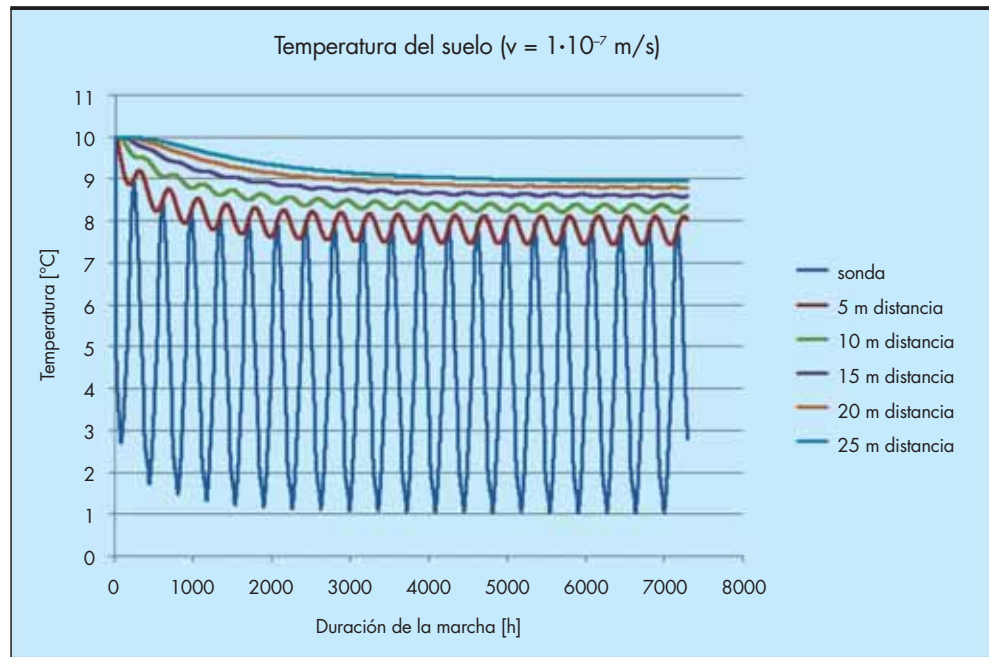


FIGURA 6. Temperatura del suelo en los puntos de observación de una sonda de extracción de 60 m, arena saturada con un flujo de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (0,0086 m/d).

En general con una distancia mayor a las sondas vecinas se reduce el impacto térmico. Durante el dimensionamiento se debe considerar la localización con respecto a la dirección del flujo de agua freática. Las sondas localizadas en la zona de defluencia de la corriente del agua freática están más afectadas por las sondas vecinas que las sondas situadas paralelas o en la afluencia (véase figura 7 y 8), porque un flujo con temperatura reducida por la extracción del calor pasa a las sondas en la defluencia. Por tanto, para un dimensionamiento realista de las sondas situadas en la defluencia se debería tener en cuenta la presencia de la corriente del agua subterránea que resulta en una disminución de la temperatura del suelo.

Para demostrar la interferencia entre las sondas una planta de extracción de 25 kW compuesta por 5 sondas de igual longitud, $L = 95$ m, situadas a una distancia de 6 m fue simulada en la arena saturada con una velocidad del agua freática de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Mirando al extremo una estratificación del suelo de la arena saturada por la longitud completa de la sonda es el caso más desfavorable para la influencia térmica porque el espaciamiento de la influencia térmica es mayor en la arena en comparación con los suelos cohesivos a causa de

una mayor conductividad y de velocidades mayores del agua subterránea.

Los puntos de observación (figura 9) se refieren a la sonda en la mitad de la planta y la distancia a ella en la dirección de la corriente. Como resultado de los cálculos es obligatoria una longitud mayor de la sonda en la mitad de la planta de 95 m (en comparación de la longitud de 60 m de una sonda singular, figura 6) a causa de la interferencia de las sondas para cumplir los $0,5^\circ\text{C}$ de temperatura mínima. Es un incremento de 35 m (58%). figura 8 demuestra que la sonda en la mitad y las sondas en la defluencia de la corriente sufren de una reducción de la temperatura debido a las sondas en la afluencia. Observando los resultados para los puntos de observación es evidente que la expansión de la influencia térmica es mucho más grande (a una distancia de 25 m: $6,5^\circ\text{C}$) que en el caso de una sonda singular (a una distancia de 25 m: $8,9^\circ\text{C}$), véase figura 6.

Por supuesto el impacto térmico de la instalación depende de la potencia total y del número y longitud de las sondas que la configuran. La magnitud de la interferencia térmica de las instalaciones vecinas depende de la existencia de la corriente del agua freática, de su velocidad, de la distancia entre las instalaciones y del espesor del acuífero.

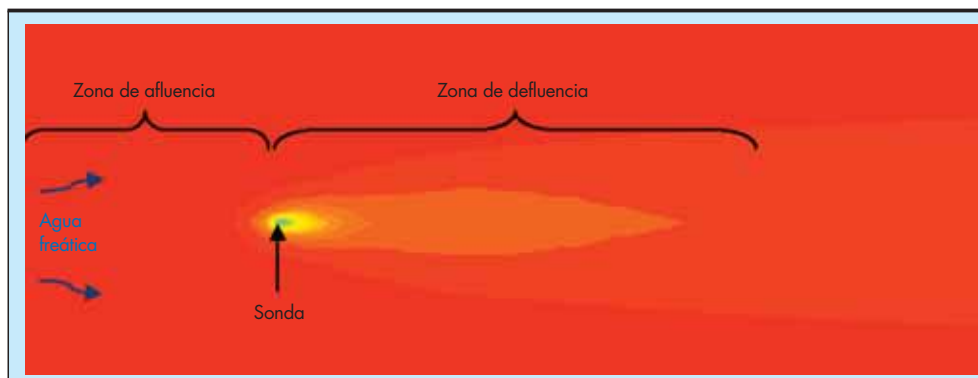


FIGURA 7. Zonas de afluencia y defluencia resultantes del cálculo de una sonda de extracción en arena saturada afectada por una corriente de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s

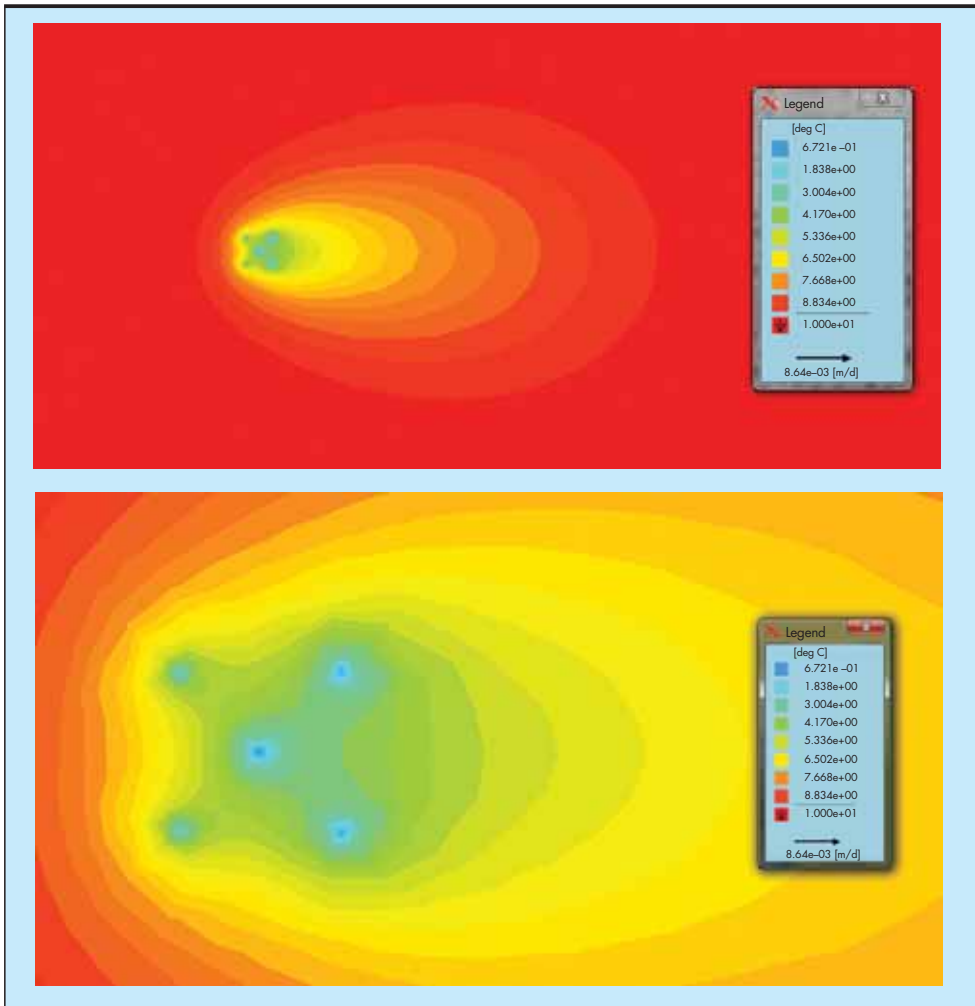


FIGURA 8. Temperatura del suelo de una instalación de 5 sondas de extracción de 95 m, arena saturada con una corriente de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s ($0,0086$ m/d) después de 20 años (en invierno).

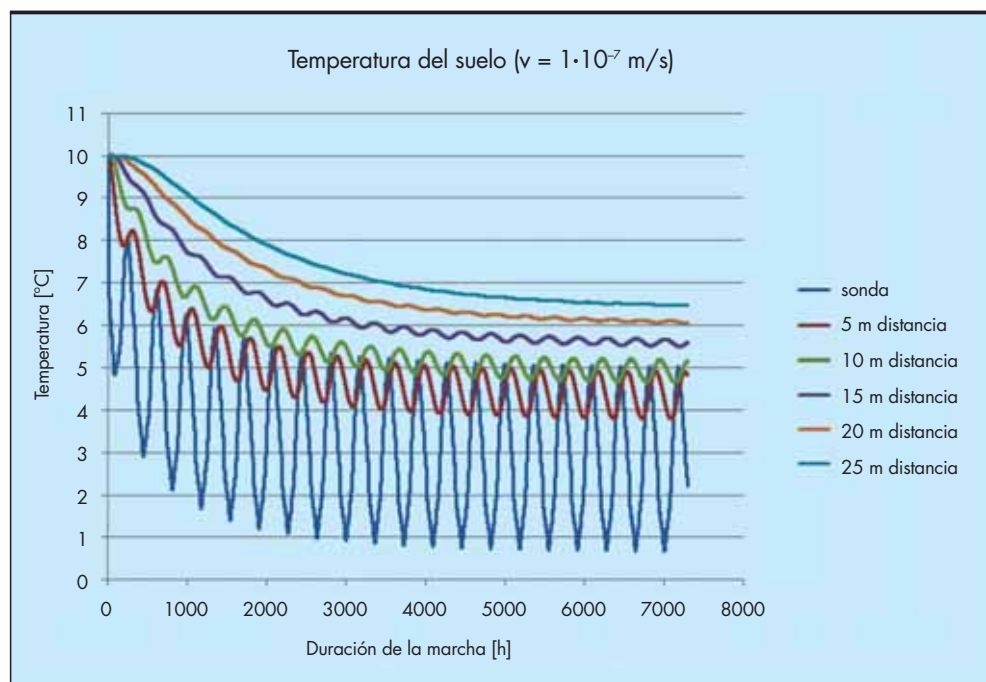


FIGURA 9. Temperatura del suelo en los puntos de observación de una planta de 5 sondas de sustracción de 95 m, arena saturada con una corriente de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s ($0,086$ m/d), relativamente a la sonda del medio.

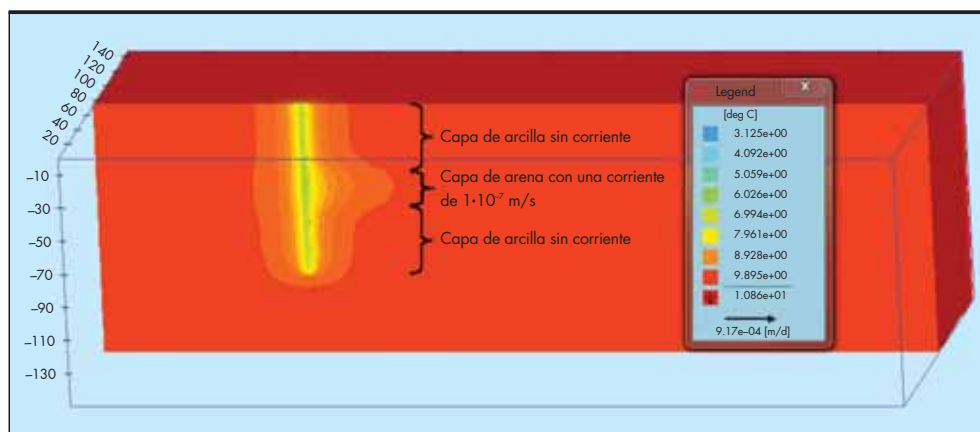


FIGURA 10. Resultado del modelo 3D de una sonda de 100m con estratificación: arcilla saturada - arena saturada con corriente del agua freática ($1 \cdot 10^{-7}$ m/s) - arcilla saturada, después de 2 años (en invierno).

En la figura 10 se muestran los resultados del cálculo de una sonda de 100 m longitud con FEFLOW teniendo en cuenta una estratificación formada por una capa superior de arcilla saturada (0–40 m) sin corriente, 20 m de arena con corriente del agua de $1 \cdot 10^{-7}$ m/s y una capa de arcilla saturada subyacente sin corriente. La temperatura natural del suelo es 10°C . Es evidente que en este ejemplo las instalaciones vecinas resultan más influidas por la capa de arena, porque la zona de la temperatura reducida respectivamente a la interferencia térmica con la corriente de agua freática se extiende mucho más ampliamente en la capa de la arena que en la capa de la arcilla.

Para la eficiencia de la instalación la capa con corriente es decisiva. La eficiencia de la sonda crece con la convección y permite un dimensionamiento más económico por medio de una reducción de la longitud de la sonda. La magnitud de la reducción depende de la localización y del espesor del acuífero. Si se examina la corriente del agua freática en la parte inferior de la sonda, una reducción de la sonda implica una reducción de la zona más efectiva de la sonda y no es recomendable. Por el contrario, si la zona de corriente se sitúa en la parte media o superior, una disminución de la longitud de la sonda en la zona inferior, que es menos efectiva, es razonable. En el ejemplo presentado en figura 10, una reducción de la sonda es razonable porque significa una reducción de la parte de la sonda que está situada en la arcilla menos efectiva. Así, el conocimiento exacto de la localización y del espesor del acuífero es muy útil para un dimensionamiento económico. Un ensayo in-situ, como el Enhanced Geothermal Response Test, permite una detección de las capas con convección.

5. INVESTIGACIÓN IN SITU

La investigación mediante el ensayo in situ Geothermal Response Test (GRT) realizada en una sonda geotérmica que puede ser integrada en la planta geotérmica final ofrece informaciones sobre el parámetro de la conductividad media térmica efectiva λ_{eff} del suelo así como de la resistencia del orificio de perforación R_b (Austin 1998, Katzenbach et al. 2007). Sin embargo el GRT no da informaciones sobre la distinción de los mecanismos del transporte energético: conducción y convección (véase capítulo 2). Para condiciones del suelo sin o con poca corriente se puede usar una conductividad promedio, la conductividad efectiva. Se debe tener cuidado si la velocidad del agua subterránea es alta y la convección se vuelve dominante, ya que los resultados del GRT estarán afectados. Una determinación de la conductividad efectiva no es posible porque el análisis de la relación de temperatura (T) y el logaritmo

del tiempo ($\ln t$) no es lineal. En este caso, para evaluar los parámetros térmicos para el dimensionamiento del sistema geotérmico, los mecanismos del transporte deben ser determinados individualizadamente, por ejemplo mediante un retroanálisis con elementos finitos.

El ensayo Enhanced Geothermal Response Test (EGRT), modalidad desarrollada del anterior, sirve para obtener informaciones sobre el comportamiento térmico del suelo a lo largo de la sonda usando un cable híbrido que consiste en un cable de cobre y una fibra de vidrio. Estos cables son fijados a la sonda antes de la instalación y permanecen en el suelo. Así se permite una repetición del ensayo. Mediante el EGRT se obtienen las conductividades térmicas efectivas de las diferentes capas del suelo. El EGRT permite la detección de los niveles de agua corriente, de fisuras llenas de agua y de defectos del relleno. Además el EGRT ofrece la posibilidad de estimar la velocidad visible del agua mediante el análisis del número de Peclet. Para usarlo es obligatorio saber la estratigrafía del subsuelo en esa parte del acuífero (Heidinger et al. 2004).

6. IMPACTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

La construcción de las instalaciones geotérmicas debe ser ecológica, ofreciendo seguridad en la obra al mismo tiempo. Además, es obligatorio el cumplimiento de las normas y especificaciones constructivas. La calidad de las sondas geotérmicas se asegura mediante un transporte cuidadoso de los tubos sin daño, el cual es tan importante como el control de la presión. El control de los tubos mediante presión se debe practicar antes y después de la instalación y antes de rellenar la perforación. Una buena conducción térmica entre el relleno y el suelo puede ser obtenida aportando el relleno completo con el sistema contructor de abajo arriba.

En caso de varios niveles del agua subterránea el uso de un “packer” u obturador es obligatorio para evitar un cortocircuito entre los niveles del agua subterránea durante la perforación. Además una buena calidad del relleno sin fisuras, que puede ser controlada mediante el EGRT, evita el cortocircuito. La protección del agua subterránea contra contaminación a través del fluido evacuado se asegura mediante la impermeabilización del relleno de la sonda geotérmica que a su vez la protege contra la infiltración del agua. Para garantizar esta propiedad, los materiales del relleno deben ser resistentes al ciclo de hielo-deshielo que genera fisuras en el relleno. A los fabricantes de los materiales se les obliga a garantizar la conformidad de los materiales.

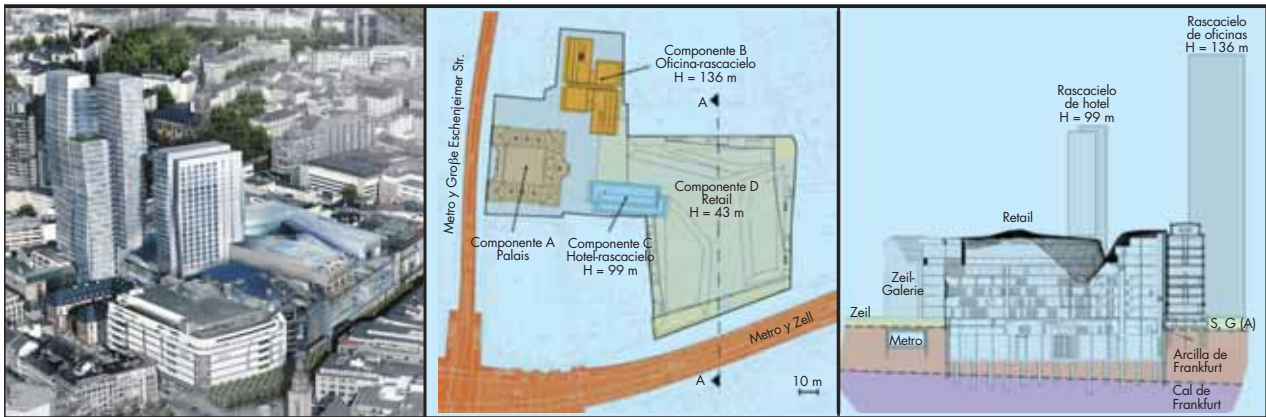


FIGURA 11. Proyecto PalaisQuartier – modelo, en planta y perfil.

7. OBJETO DE DEMOSTRACIÓN: PALAISQUARTIER EN FRANCFORT DEL MENO, ALEMANIA

En el centro de Fráncfort del Meno (Frankfurt am Main), Alemania, se finalizó el proyecto PalaisQuartier, con una superficie de 17.400 m². El edificio está cimentado sobre 302 pilotes con un diámetro hasta 1,86 m y una longitud hasta 27 m. El muro de revestimiento está compuesto por 543 pilotes con un diámetro de 1,5 m y una longitud de hasta 38 m. En la zona superior, los pilotes atraviesan la “Arcilla de Frankfurt” y por debajo, la “Cal de Frankfurt” (figura 11).

En la zona de menor distancia entre pilotes (bajo el rascacielos) solamente pocos son activados como pilotes energéticos. En total, 262 de los 302 pilotes de cimentación y 130 de los 543 pilotes del muro pantalla fueron activados para uso geotérmico. Estos 392 pilotes fueron previstos para una carga total geotérmica de 913 kW. El suelo se utiliza como almacenador térmico: en el invierno la energía se extrae del suelo mediante el fluido circulando en los tubos. Esto produce una reducción de la temperatura del suelo, que es equivalente a un almacenamiento de frío.

Para evitar una reducción de la temperatura del suelo a largo plazo, durante el verano se aporta calor al terreno. El

edificio es enfriado mediante el frío que fue guardado en el suelo durante el invierno (van Meurs 1986). De esta manera se recupera el nivel de temperatura (Brandl et al. 2006). Para el dimensionamiento, fue estimada una energía de aproximadamente 2.350 MWh/a durante el invierno, y de 2.410 MWh/a durante el verano. La temperatura del agua subterránea fue medida mediante un pozo; el resultado es una temperatura casi constante con la profundidad, y varía entre 15,8°C a una profundidad de 8 m y 17,7°C a una profundidad de más de 6 m. Estas temperaturas son bastante altas y resultan de influencias antrópicas como sótanos, metros etc.

7.1. INFLUENCIA TÉRMICA DEL PALAISQUARTIER EN LOS TERRENOS VECINOS

Simulaciones numéricas tridimensionales con modelos simultáneos para la corriente de agua subterránea y el transporte de calor utilizando el método de elementos finitos (FEM) permiten una investigación de la influencia térmica en los terrenos vecinos. La estratificación del suelo debe ser reproducida ajustadamente. Todos los pilotes están cimentados en su parte superior atravesando las capas de la Arcilla de Frankfurt, y por debajo las capas de la Cal de Frankfurt, que tienen una permeabilidad hidráulica más alta.

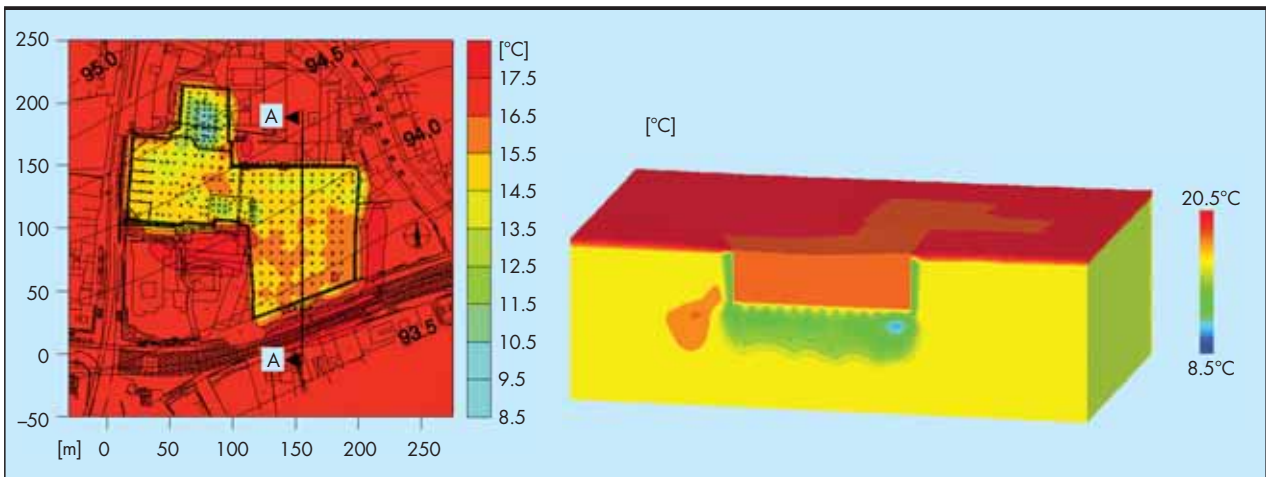


FIGURA 12. Desarrollo de las isotermas después del funcionamiento en invierno. Izquierda: horizontal de la temperatura y del nivel del agua subterránea en la Cal de Frankfurt [mNN]. Derecha: corte vertical A-A.

Los resultados de los cálculos con elementos finitos muestran, primero, la mayor influencia térmica de la cimentación esperada en las zonas en las cuales los pilotes de energía se encuentran

ubicados de manera más densa. La zona bajo el núcleo del edificio de oficinas es, debido a la cercanía de la zona con más alta densidad de pilotes, la más solicitada térmicamente.

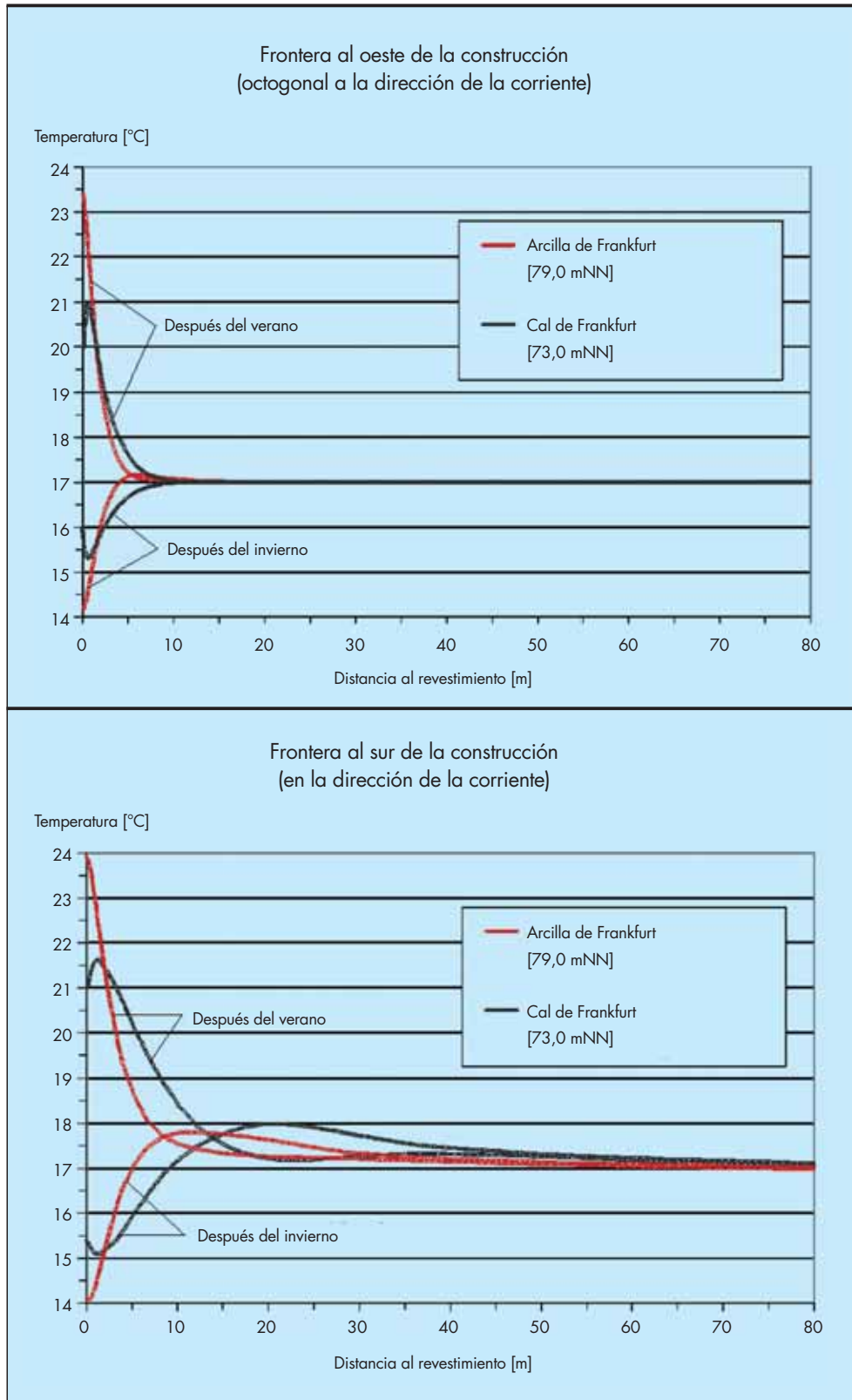


FIGURA 13. Distribución calculada de la temperatura alrededor de la zona del proyecto después del funcionamiento en verano y en invierno.

La expansión del campo de temperatura actúa sobre la dirección de la corriente de agua subterránea debido a la alta permeabilidad de la rocosa Cal de Frankfurt y, en comparación con la Arcilla de Frankfurt, a la alta velocidad de flujo de las aguas freáticas que lo acompañan, lo que genera en los estratos de Cal un incremento de la zona de influencia térmica.

La distribución de temperaturas mostradas en la figura 13, presenta una expansión de la zona térmicamente influenciada alrededor de la zona del proyecto en dirección occidental, en un corte que va perpendicular a la dirección de la corriente, y en dirección sur en el sentido de la corriente de las aguas subterráneas. En el margen occidental, la curva de temperatura disminuye después de 2-3 m hasta una diferencia máxima de temperatura con relación a la temperatura inicial no alterada de la cimentación ($T_0 = 17^\circ\text{C}$) de $\Delta T < 1,0 \text{ K}$. A una distancia de cerca de 10 m del muro pantalla casi no existe cambio de temperatura del suelo. En el margen sur de la zona del proyecto, en la dirección del flujo de agua subterránea, se genera, debido al fuerte transporte de calor por convección, una expansión de la zona de influencia térmica. A una distancia de 12 m, el cambio de temperatura alcanza inicialmente valores de $\Delta T < 1,0 \text{ K}$; a una distancia de 20 m aumenta, en la Cal de Frankfurt, nuevamente a 1,0 K a causa de la inercia térmica y el funcionamiento temporal, y desciende finalmente a una distancia de cerca de 40 m hasta valores de $\Delta T = 0,5 \text{ K}$ (Katzenbach et al. 2008).

8. CONCLUSIONES

Por lo que respecta a los sistemas de extracción, en relación a los de extracción-inyección de calor, el impacto de la corriente del agua freática es positivo. En general una consideración del agua freática puede resultar en instalaciones más económicas porque la corriente apoya la regeneración térmica del suelo. El impacto depende de las condiciones secundarias. A modo de ejemplo está demostrado que ya velocidades de $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ pueden aumentar la potencia efectiva de las sondas y reducir la longitud de las mismas. La magnitud de la reducción depende de la localización del acuífero.

Con respecto a instalaciones cercanas, una consideración de la corriente del agua subterránea durante el dimensionamiento es obligatoria para evitar una influencia térmica entre los sistemas geotérmicos. La corriente del agua subterránea logra una gran mejora de la reducción de la temperatura del suelo en la zona de la sonda y hasta una distancia de cerca de 10 m. De ahí en adelante el impacto térmico puede aumentarse o disminuirse en función de la velocidad del agua freática. Además de una investigación del nivel del agua y de los componentes del agua, la velocidad de la corriente es de interés.

Investigaciones in-situ como el ensayo Geothermal Response Test son muy valiosas para obtener informaciones sobre la localización de las capas con corriente del agua y los parámetros efectivos, teniendo en cuenta los efectos del agua subterránea en el transporte de calor. Estas informaciones ofrecidas permiten un dimensionamiento detallado y eficiente. Especialmente en zonas urbanas, un dimensionamiento detallado es decisivo para una consideración de las condiciones globales.

Mediante esta publicación de los resultados de investigaciones numéricas, se llama la atención hacia la importancia del conocimiento del flujo del agua subterránea para asegurar un dimensionamiento de las plantas eficiente y económico y para reducir el riesgo de la interferencia con las plantas vecinas.

9. REFERENCIAS

- Austin, W. (1998). Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. MSc-Thesis, Oklahoma State University, 164 p.
- Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. Environmental science series, American Elsevier, New York.
- Brandl, H., Adam, D., Markiewicz, R. (2006). Ground-Sourced Energy Wells for Heating and Cooling of Buildings. Acta Geotechnica Slovenica Vol. 3, 2006/1, S. 5-27.
- Heidinger, P., Dornstädter, J., Fabritius, A., Wahl, G., Welter, M., Zurek (2004). EGRT - Enhanced Geothermal Response Tests 5. Symposium "ground-coupled heat pumps", Annual Convention of the Geothermische Vereinigung, Germany.
- Katzenbach, R., Vogler, M., Waberseck, T. (2008). Große Energiepflanzanlagen in urbanen Ballungsgebieten. Bauingenieur, 83 (2008), 343-348.
- Katzenbach, R., Clauss, F., Waberseck, T., Wagner, I. (2007). Geothermal Site Investigation - Present Developments of the Geothermal Response Test, Geothermal Resources Council, Transactions, Vol. 31, Renewable Baseload Energy: Geothermal Heat Pumps to Engineered Reservoirs, GRC 2007 Annual Meeting, 30.09-03.10.2007, Reno, Nevada, USA, S. 477-481.
- Nield, D.A., Bejan, A. (1999). Convection in Porous Media. Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 2nd edition.
- Van Meurs, G. A. M. (1986). Seasonal Storage in the Soil. Thesis, Department of Applied Physics, University of Technology Delft, 1986.
- VDI (2001). VDI-Richtlinie - VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Berlin.