

Proyecto GEPO – POTencial GEotérmico de la llanura glaciofluvial de Múnich: Estimación del potencial geotérmico en las capas someras del subsuelo del acuífero cuaternario del área metropolitana de Múnich

Autores de la comunicación: K. Zosseder¹, A. Albarrán²

1 Universidad Técnica de Múnich – Departamento de Hidrogeología, Arcisstr. 21, 80333 Múnich, Alemania, kai.zosseder@tum.de

2 Universidad Técnica de Múnich – Departamento de Hidrogeología, Arcisstr. 21, 80333 Múnich, Alemania, alberto.albarran@tum.de

Resumen: El proyecto de investigación GEPO, iniciado en el año 2012, analiza las condiciones geotérmicas en la llanura glaciofluvial de Múnich, centrándose en el estudio del acuífero cuaternario. En el marco del proyecto se han llevado a cabo numerosos trabajos de investigación de gabinete así como la campaña de medición de agua subterránea de mayor escala realizada hasta la fecha en Baviera. Todo ello permitirá estimar el potencial geotérmico superficial y mejorar la gestión térmica del agua subterránea en el área de Múnich.

Palabras clave: energía geotérmica, geotermia somera, llanura glaciofluvial de Múnich, potencial geotérmico, gestión térmica de recursos geotérmicos

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La geotermia somera desempeña un papel relevante en la producción de calefacción y refrigeración a partir de fuentes de energía renovables y contribuye de una manera importante a la reducción de emisiones de CO₂. Sin embargo, esta fuente de energía requiere de unas condiciones naturales previas favorables del subsuelo.

El **Servicio Estatal Bávaro de Medioambiente** (abreviado por sus siglas en alemán **LfU**) ha encargado al **Departamento de Hidrogeología de la Universidad Técnica de Múnich** la realización del proyecto de investigación GEPO (POTencial GEotérmico de la llanura glaciofluvial de Múnich) con el objetivo de mejorar el grado de conocimiento geocientífico de las capas más superficiales del subsuelo del área metropolitana de Múnich y de investigar con mayor nivel de detalle sus condiciones para su aprovechamiento mediante sistemas geotérmicos someros. El Proyecto GEPO es financiado por el **Ministerio Estatal Bávaro de Medio Ambiente y de Salud** (por sus siglas **StMUG**) con aproximadamente 840.000 euros.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es la **elaboración de una amplia base de información geocientífica de datos hidrogeológicos y geotérmicos del acuífero cuaternario en el área de Múnich.**

Esta información servirá como base para la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- **Estimación del potencial geotérmico superficial** en el área de Múnich.
- Puesta a disposición de los ciudadanos en general y de las administraciones públicas de **documentación e información técnica** sobre la energía geotérmica (por ejemplo, a través del Sistema de Información del Suelo de Baviera – BIS-BY).
- Aumento del nivel de detalle de diverso material cartográfico en escalas de trabajo adecuadas para la **planificación y autorización administrativa de aprovechamientos geotérmicos** en Baviera.

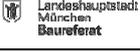
- Profundización del conocimiento geocientífico en el área de estudio que propiciará una adecuada **gestión térmica de los recursos hídricos subterráneos**.

Los objetivos planteados deberán conseguirse en los tres años y medio de duración del proyecto, que comprenden **desde el mes de junio de 2012 hasta finales de 2015**.

1.3. INSTITUCIONES PARTICIPANTES EN EL PROYECTO

El proyecto es apoyado de manera significativa por las instituciones que figuran en la Tabla I:

Tabla I. Instituciones participantes en el proyecto

LOGOTIPO	INSTITUCIÓN	DESCRIPCIÓN
	Stadtwerke München GmbH	Empresa municipal de servicios públicos de Múnich
	Autobahndirektion Südbayern (ABDS)	Dirección de Autopistas del Sur de Baviera
	Flughafen München GmbH	Aeropuerto de Múnich
	E.ON	Empresa del sector energético
	Landeshauptstadt München. Baureferat Ingenieurbau	Ayuntamiento de Múnich. Servicio de obras
	Landeshauptstadt München. Referat für Gesundheit und Umwelt	Ayuntamiento de Múnich. Servicio de Salud y Medio Ambiente
	Münchner Stadtentwässerung	Empresa de alcantarillado de Múnich
	Wasserwirtschaftsamt München, Rosenheim und Weilheim	Organismos responsables de la gestión del agua en Múnich, Rosenheim y Weilheim

2. ÁREA DE INVESTIGACIÓN Y RESUMEN GEOLÓGICO

2.1. ÁREA DE INVESTIGACIÓN

La zona objeto de estudio se encuentra en el área metropolitana de Múnich y tiene una superficie total de aproximadamente **2.250 km²**. Dicha zona abarca toda la **llanura glaciofluvial de Múnich**, la cual ocupa parcialmente los distritos de Fürstfeldbruck, Starnberg, Múnich, Wolfratshausen, Miesbach, Ebersberg, Erding, Freising, Landshut y Dachau, mientras que la ciudad de Múnich está englobada en su totalidad.

La Figura 1 muestra la delimitación territorial del proyecto de investigación. Desde un punto de vista geográfico, la llanura glaciofluvial de Múnich está delimitada al Sur por un paisaje de morrenas caracterizado por terrenos irregulares mientras que al Noreste y al Este se encuentra delimitado por las estribaciones montañosas de Baja y Alta Baviera.

2.2. BOSQUEJO GEOLÓGICO

La geología en el área de Múnich y su entorno ha sido explorada y bien documentada en las últimas décadas fruto de múltiples obras de infraestructuras, así como de la construcción de las líneas de los sistemas de transporte de metro y cercanías de la ciudad de Múnich. El relleno sedimentario de la llanura glaciofluvial de Múnich está constituido en su parte superior por **terrazas aluviales cuaternarias** de espesores comprendidos entre unos pocos metros hasta varias decenas de metros, las cuales están formadas fundamentalmente por depósitos clásticos de origen fluvial y

glaciofluvial. Subyace a este paquete en marcada discordancia erosiva otro paquete de **sedimentos neógenos de la Unidad Molasa Marina de Agua Dulce Superior (OSM, obere Süßwassermolasse)**, los cuales están constituidos por depósitos clásticos de menores granulometrías (BAUER et al. 2005). De esta manera, el paquete clástico cuaternario superior constituye el primer nivel acuífero, el cual, debido a la alta a muy alta permeabilidad de sus gravas y a su disposición homogénea, es especialmente adecuado para un aprovechamiento térmico. **En el marco del Proyecto GEPO se priorizará el estudio del acuífero cuaternario.**

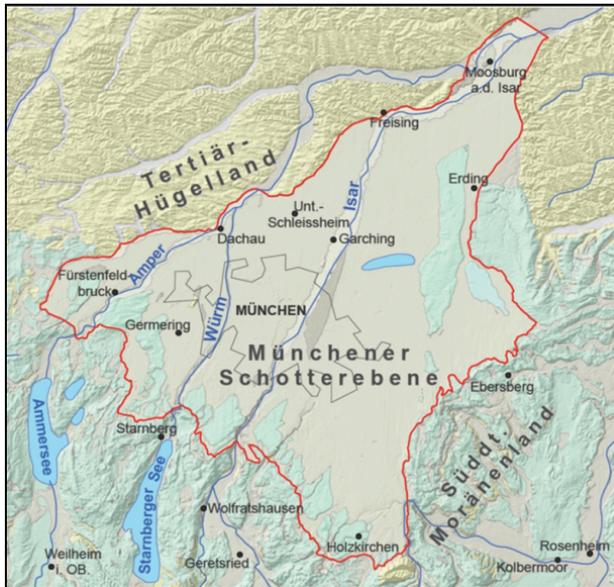


Figura 1. Área de investigación del Proyecto GEPO

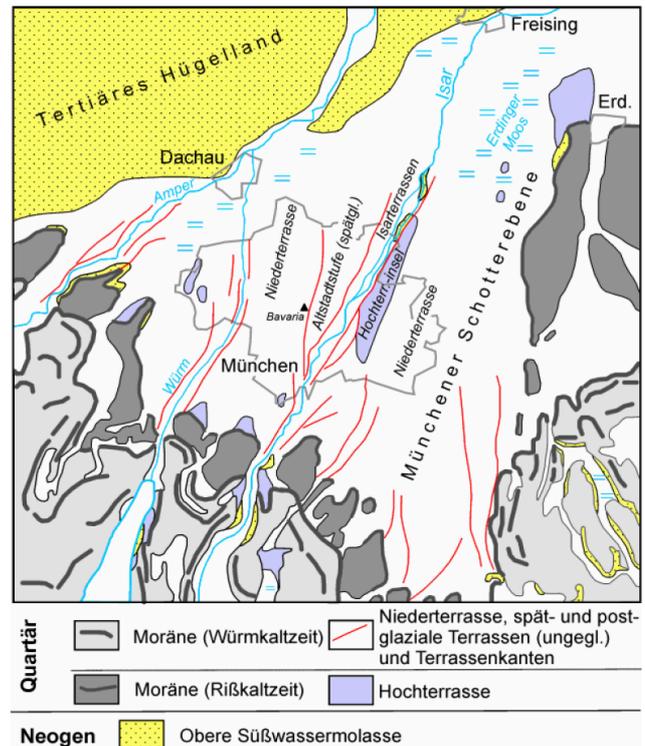


Figura 2. Mapa geológico simplificado de Múnich y su entorno (BAUER et a. 2005)

3. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN EXISTENTE Y TRATAMIENTO DIGITAL DE DATOS

Los trabajos de recopilación, análisis, archivado y digitalización de material bibliográfico, cartográfico y paramétrico se iniciaron en el año 2012. Desde entonces se ha creado una base de datos de documentación y los datos adquiridos son analizados e incorporados de forma continuada al sistema. Tal y como se indicó en el planteamiento de los objetivos, en el marco del proyecto se buscan datos geotérmicos e hidrogeológicos de relevancia, los cuales son controlados desde el punto de vista de su calidad y posteriormente son evaluados. Estos parámetros clave serán tratados a partir de entonces de forma digital.

3.2. ARCHIVADO CONTINUO Y CONTROL DE CALIDAD DE DATOS DE FUENTES Y CAPTACIONES DE AGUA DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN DEL SUELO DE BAVIERA (BIS-BY)

El **Sistema de Información del Suelo de Baviera (BIS-BY)**, que entró en funcionamiento en el año 2003, sirve a las administraciones públicas bávaras en la aplicación de la legislación en materia de protección del suelo y suministra también al público en general a través de internet informaciones de tipo geocientífico. Este sistema, abreviado BIS-BY, es la herramienta central para el archivado y la búsqueda de datos del suelo, rocas y el subsuelo profundo de Baviera.

Para garantizar la calidad de los contenidos de este sistema, sensibilizar a las diferentes instituciones que disponen de datos geológicos sobre el uso del BIS-BY y mantener a largo plazo un sistema de información del suelo completo, consistente y actualizado, se lleva a cabo de forma continuada desde el inicio del proyecto un control de calidad de los datos contenidos en el sistema procedentes de puntos de agua (sondeos, piezómetros, manantiales, pozos) e instalaciones geotérmicas, entre otros. Los datos de todas las instituciones participantes en el proyecto que disponen de información al respecto son identificados, digitalizados e integrados en el sistema. Hasta finales del año 2013 se han revisado más de 680 objetos y se han incorporado más de 450 nuevos objetos en el sistema. En este sentido, un objeto se entiende como cada uno de los puntos de agua o instalaciones geotérmicas del sistema.

3.3. CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS Y TEMPERATURAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El Departamento de Hidrogeología de la Universidad Técnica de Múnich junto con el LfU han planificado **una campaña para medir los niveles piezométricos y las temperaturas del agua subterránea en toda la llanura glaciofluvial de Múnich**. El tipo de medición se dividió en dos clases: *Medidas Internas*, entendiéndose como tal las medidas realizadas por el propietario de la estación de medición y *Medidas Externas*, para las realizadas por el equipo de proyecto (ver Tabla II).

Tabla II. Tabla resumen de los puntos de medición considerados en la campaña de medición

INSTITUCIÓN	TIPO DE MEDICIÓN	NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN
Empresas e instituciones	Medida externa	≈ 3.000
Terceros (suministro de agua, municipios y propietarios privados)	Medida externa e interna	≈ 3.500
Total	-	≈ 6.500

Los trabajos de campo se realizaron por un equipo humano de 35 personas y tuvieron lugar durante los meses de abril y mayo de 2014. A continuación se resumen algunos de sus aspectos principales:

- **Campaña más grande** realizada hasta la fecha en la llanura glaciofluvial de Múnich.
- **Medidas en Cuaternario y Terciario**, tanto en **zona urbana como en extrarradio**.
- Elevado número de puntos de medición (aproximadamente 6.500), lo que ha posibilitado alcanzar un **elevado nivel de detalle**.
- Medición complementaria de temperaturas del agua subterránea en el extrarradio.
- Documentación fotográfica de los puntos de medición utilizados.

3.4. INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉRMICOS OBJETIVO

Los datos y la información geocientífica recopilada hasta ahora junto con el elevado número de mediciones del nivel piezométrico y de temperatura adquiridas en los trabajos de campo constituyen la base para la posterior estimación del potencial geotérmico en el área de Múnich.

La estimación del potencial geotérmico superficial se lleva a cabo mediante la investigación a gran escala en la zona de estudio de una serie de parámetros de gran relevancia desde el punto de vista geotérmico (ver Figura 3). Dichos factores son considerados **parámetros geotérmicos objetivo** y se pueden subdividir en dos clases: parámetros **de tipo hidráulico** y **de tipo térmico**. La determinación de estos parámetros permite definir el **flujo volumétrico** y la **temperatura** del agua subterránea, que a su vez permiten definir la **potencia térmica geotérmica potencial**.

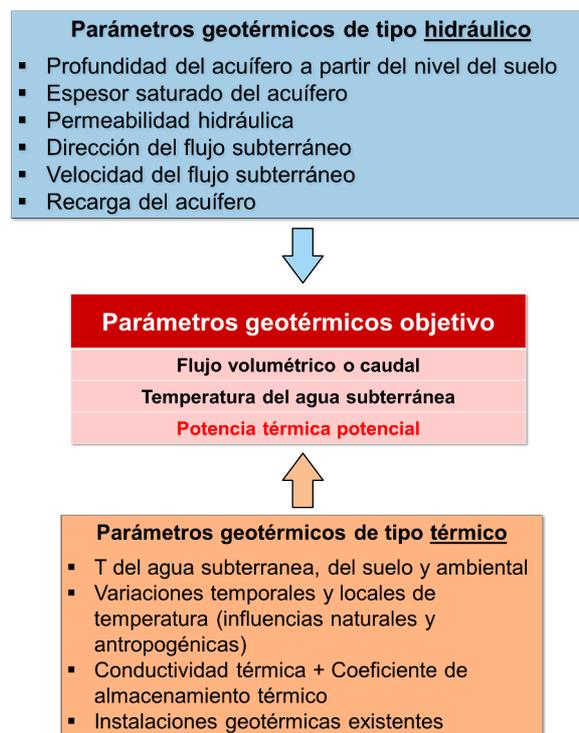


Figura 3. Metodología de investigación de parámetros geotérmicos objetivo

3.4.1. INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉRMICOS DE TIPO HIDRÁULICO

A continuación se describe el estado actual de las investigaciones de aquellos parámetros hidráulicos que nos permiten estudiar el compartamiento de la dinámica del agua subterránea.

La **estructura de la base del acuífero cuaternario** (Figura 4) tiene una importante influencia sobre el flujo de agua subterránea. Del análisis de más de 14.000 perfiles de perforación correspondientes a la zona urbana de Múnich se desprenden estructuras cuaternarias en forma de canal que discurren en dirección NNE.

A través de las medidas de los niveles piezométricos y de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de alta resolución (2 m de paso de malla) se puede representar la **profundidad media del agua del acuífero cuaternario** en el área de investigación (Figura 5). Esta representación considera las variaciones de la profundidad de la superficie de saturación medidas a partir del nivel del suelo. Los

valores de temperatura del agua subterránea presentan grandes variaciones en las partes septentrionales de la zona de estudio, las cuales están condicionadas por las pequeñas profundidades medias del acuífero y por la consecuente mayor influencia de la temperatura ambiente.

En base a datos analizados de un gran número de ensayos de bombeo realizados en toda la zona de investigación (se estima que hasta el momento cerca de 300) se ha calculado la **permeabilidad hidráulica** y el **espesor saturado del acuífero**. La Figura 6 muestra una distribución muy variable de los flujos volumétricos útiles en la zona urbana. Conviene citar la presencia de mayores espesores saturados de acuífero en las estructuras cuaternarias en forma de canal.

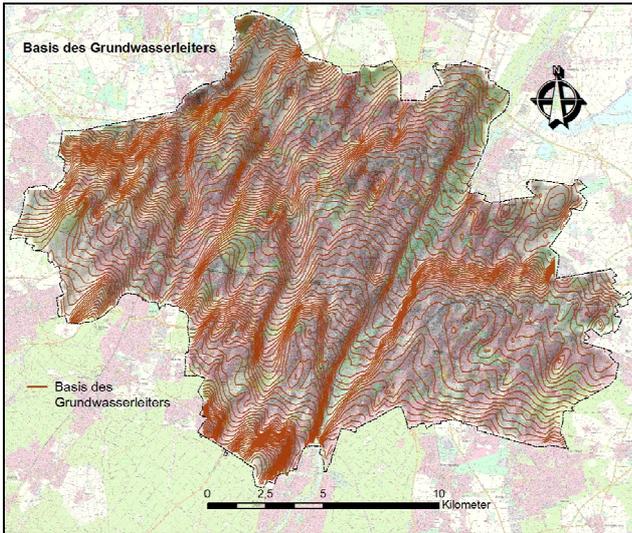


Figura 4. Estructura de la base del acuífero cuaternario

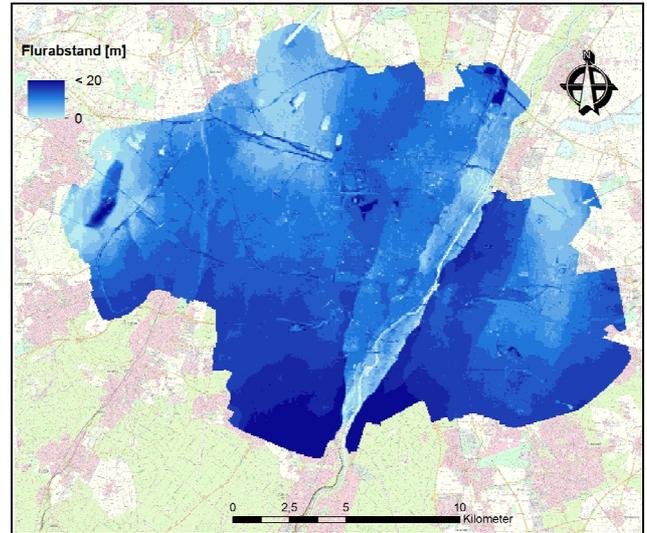


Figura 5. Profundidad del agua del acuífero cuaternario

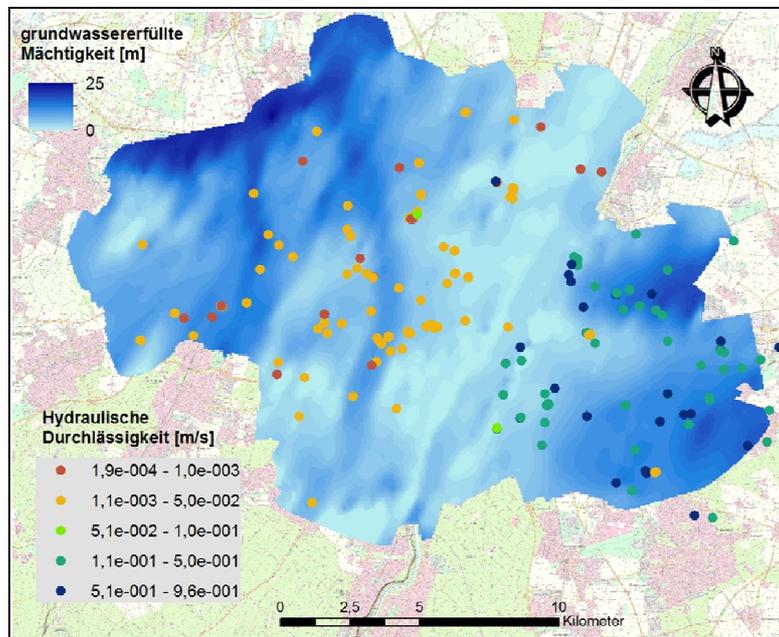


Figura 6. Espesor saturado y permeabilidad hidráulica del acuífero cuaternario

3.4.2. INVESTIGACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉRMICOS DE TIPO TÉRMICO

Teniendo en cuenta los valores existentes de temperatura del agua subterránea y los valores medidos en los trabajos de campo que sucedieron entre los meses de abril y mayo de 2014 hay que indicar la presencia de un **reparto de la temperatura del agua subterránea heterogéneo** en la zona de investigación (Figura 8). Los elevados valores de temperatura registrados en el ámbito urbano muestran un aumento de la temperatura del agua subterránea localizado en zonas urbanas. Este fenómeno es lo que se conoce como *efecto isla de calor*, el cual puede aumentar considerablemente la eficiencia de una instalación geotérmica.

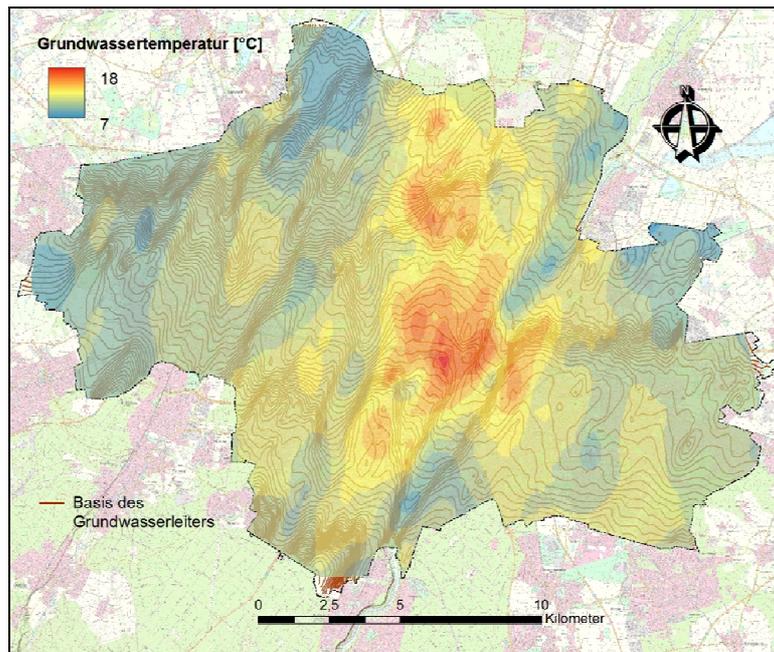


Figura 8. Reparto de temperatura del agua subterránea en el acuífero cuaternario

Es necesario estudiar la **variación de la temperatura del agua subterránea tanto estacional como temporal en periodos largos de tiempo** con objeto de planificar diferentes tipos de instalaciones geotérmicas cada vez más eficientes. En este sentido, se han estudiado las variaciones espaciales y temporales de las anomalías de temperatura así como sus posibles causas. Para ello se han considerado y analizado seis ciclos de medición de temperatura del agua subterránea entre los años 1987 y 2014 con una amplia extensión en la zona de estudio. Se representaron las isoterma de cada uno de los ciclos de medición, se elaboraron mapas de diferencias de temperatura dentro de un mismo ciclo (Figura 9) y entre ciclos diferentes y se realizaron análisis estadísticos (Figura 10).

Este análisis ha puesto de manifiesto, entre otros aspectos, un aumento medio de la temperatura del agua subterránea de 1 °C, un desfase de aproximadamente seis meses entre la temperatura del agua subterránea y la temperatura ambiente, la aparición de un cambio notable del desfase por efecto de épocas de sequía así como de inundaciones y zonas muy reducidas con valores constantes de temperatura del agua subterránea. Así mismo, se ha podido cuantificar la interacción entre la temperatura ambiental y la temperatura de aguas superficiales.

En el marco del proyecto se han llevado a cabo también **perfiles de temperatura profundos** (hasta la fecha aproximadamente 400), medidos en diferentes emplazamientos distribuidos en toda la zona de investigación, en los que se han registrado tanto la temperatura del agua subterránea como la conductividad eléctrica específica. De esta forma es posible evaluar la calidad de las mediciones

que realiza la propia estación de medición mediante la detección de flujos subterráneos de agua verticales. Además, el estudio de la temperatura a diferentes profundidades permite analizar la influencia que pueden tener sobre la temperatura del agua subterránea diversos factores naturales, como son la temperatura ambiental (Figura 11), la precipitación y las aguas superficiales, así como la afección de otros factores antropogénicos, como por ejemplo, el calor residual de las infraestructuras subterráneas (Figura 12).

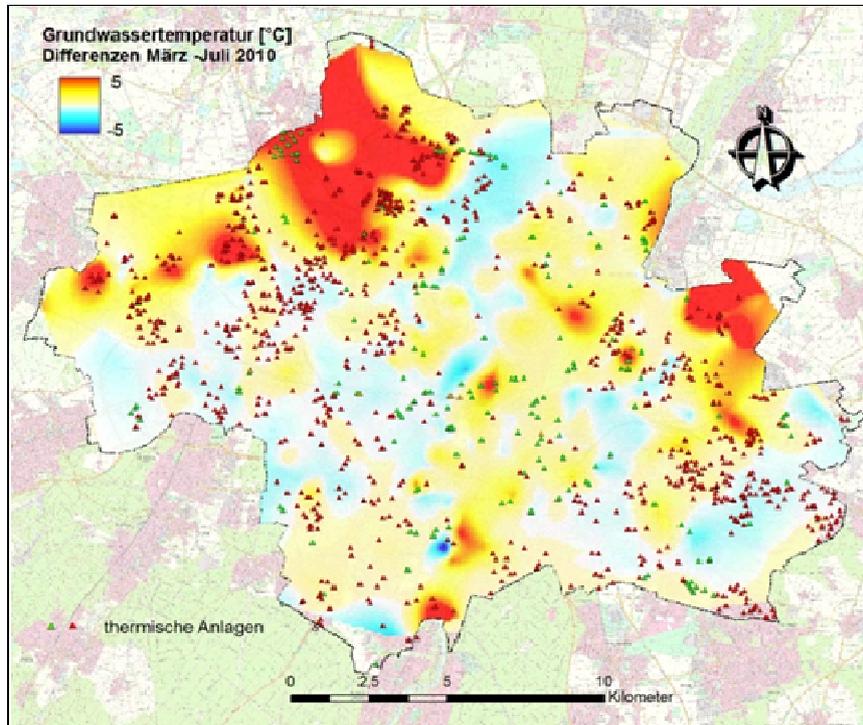


Figura 9. Las diferencias de la temperatura del agua subterránea entre ciclos de medición muestran puntos calientes (por ejemplo: influencia de instalaciones geotérmicas existentes o del metro)

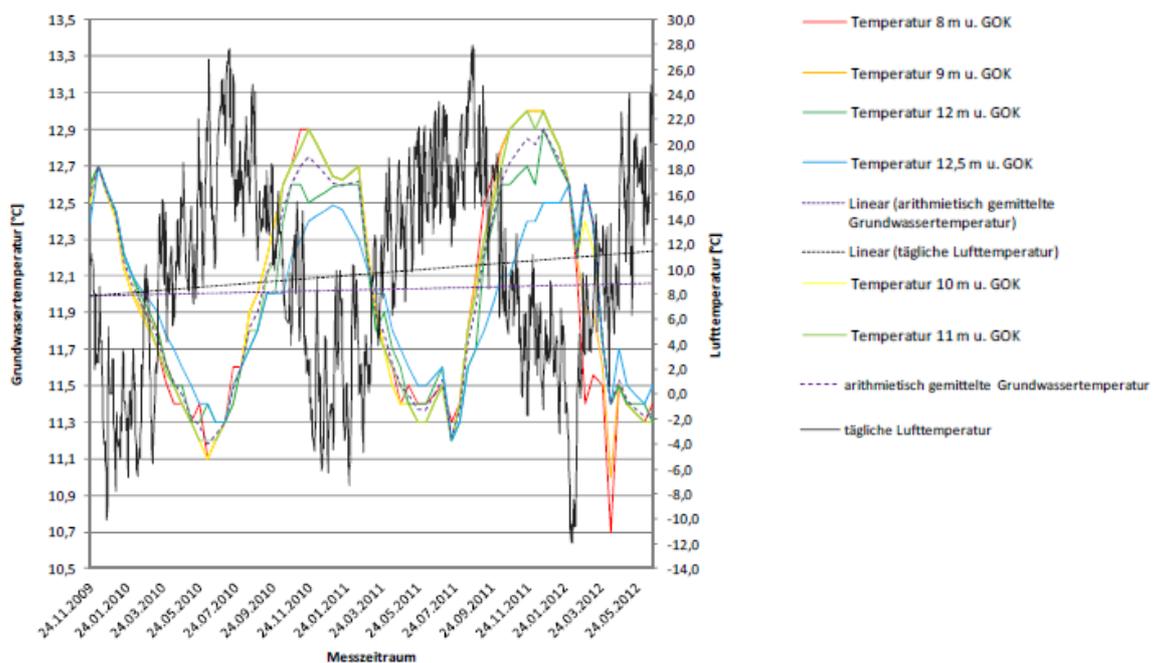


Figura 10. Las diferencias de la temperatura del agua subterránea entre ciclos de medición muestran puntos calientes (por ejemplo: influencia de instalaciones geotérmicas existentes o del metro) (LEHMANN, 2012)

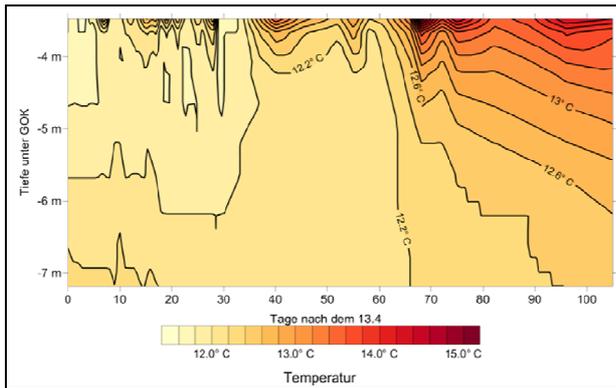


Figura 11. Mapa térmico de una medición de temperatura profunda del agua subterránea en el Norte de Múnich (WOLFF, 2012)

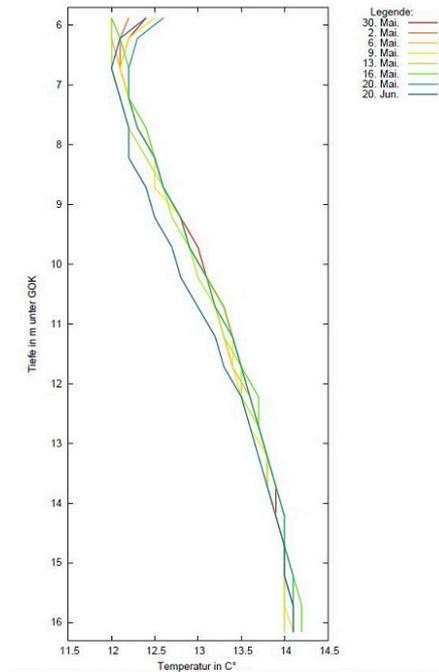


Figura 12. Medición de temperatura a distintas profundidades en una estación de metro Norte de Múnich (WOLFF, 2012)

4. PRÓXIMOS TRABAJOS

Hasta la finalización del proyecto los trabajos se centrarán, entre otros, en los siguientes aspectos:

- Elaboración y representación de líneas isopiezométricas que representan la superficie de saturación o superficie piezométrica del acuífero cuaternario.
- Análisis de curvas de temperatura de agua subterráneas representativas.
- Estudio de interacciones hidráulicas entre diferentes acuíferos.
- Estudio de unidades hidrogeológicas en relación con su conductividad térmica.
- Revisión y mejora del límite Cuaternario-Terciario.
- Modelización geológica en 3D.
- Elaboración de al menos diez cortes hidrogeológicos transversales en la zona de estudio.

5. RESULTADOS PROVISIONALES

A continuación se resumen algunos de los primeros resultados del proyecto:

- La heterogeneidad de la temperatura y del flujo subterráneo indican una variación espacial relativamente alta de la potencia térmica.
- Existencia de varias áreas de especial interés por su idoneidad para refrigeración geotérmica con temperaturas de agua subterránea bajas y constantes y con elevados flujos volumétricos (estructuras cuaternarias en forma de canal).
- Existencia de muy pocas áreas con bajos flujos subterráneos y/o elevadas variaciones de la temperatura del agua subterránea.
- Actualmente sólo se utiliza una pequeña parte del potencial geotérmico útil existente.
- Un aprovechamiento óptimo del potencial geotérmico requiere de un sistema de gestión espacial y temporal complejo.

- La metodología indicada permite hacer una estimación del potencial geotérmico superficial en términos de la potencia geotérmica potencial. Tomando un ejemplo, si elegimos la sección A-A' (Figura 13), se observan elevados flujos volumétricos, mientras que los valores de la temperatura del agua subterránea son bajos y constantes. Para un espesor saturado de acuífero de aproximadamente 10 m y una conductividad hidráulica de $K = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ se deduce una potencia térmica de refrigeración de 3 MW para un salto térmico de 5 K.

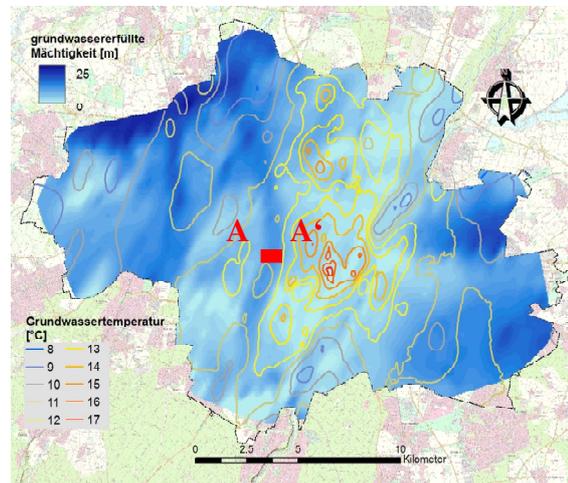


Figura 13. Espesor saturado del acuífero y temperatura de agua subterránea en una sección A-A' de Múnich

6. CONCLUSIONES

En el proyecto GEPO se han realizado hasta la fecha numerosos trabajos, tanto de gabinete como de campo, que han permitido cumplir ya algunos de los objetivos establecidos al inicio del mismo. Mediante la metodología empleada se combina el estudio de parámetros hidráulicos con el análisis de parámetros térmicos, lo que facilita abordar cuestiones e interrogantes de índole geocientífica de gran relevancia para el aprovechamiento de la energía geotérmica en el entorno de Múnich. Todo ello, junto con los próximos trabajos que se van a llevar a cabo hasta finales del año 2015, permitirá realizar una estimación del potencial geotérmico superficial de la llanura glaciofluvial de Múnich en términos de la potencia térmica potencial, así como una futura mejor gestión térmica del aprovechamiento del agua subterránea.

7. BIBLIOGRAFÍA

BAUER, M., NEUMANN, P., SCHOLZ, M. & THURO, K. (2005): Die Geologie des Münchner Untergrunds und seine Bedeutung für die Baugrundmodellbildung in städtischen Gebieten.

WOLFF, J. R. (2012): Grundwassertiefentemperaturprofile des quartären Grundwasserleiters in München. – Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Hydrogeologie, TU München.

LEHMANN, N. (2012): Untersuchungen der Ursachen von Grundwassertemperatur-Hot-Spots im quartären Grundwasserleiter Münchens. – Unveröffentlichte Masterarbeit, Lehrstuhl für Hydrogeologie, TU München.

WOLFF, J. R. (2012): Grundwassertiefentemperaturprofile des quartären Grundwasserleiters in München. – Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Hydrogeologie, TU München.

ZOSSEDER ET AL. (2014): Geothermisches Potenzial der Münchner Schotterebene – Poster Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGG, Lehrstuhl für Hydrogeologie, TU München.