

Temperatura del subsuelo superficial en los lugares seleccionados de Polonia

Maciej R. Kłonowski¹, Mateusz Żerun²

¹Instituto Geológico Polaco – Instituto Nacional de Investigación, al. Jaworowa 19, 53-122 Breslavia, Polonia

²Instituto Geológico Polaco – Instituto Nacional de Investigación, ul. Jagiellońska 76, 03-301 Varsovia, Polonia

maciej.klonowski@pgi.gov.pl, mateusz.zerun@pgi.gov.pl

Palabras clave: subsuelo superficial, temperatura del subsuelo, registro de temperatura, propiedades térmicas del subsuelo, energía geotérmica de baja temperatura/baja entalpía

RESUMEN

La evaluación de los recursos y las condiciones ambientales para la implementación de la energía geotérmica de baja temperatura (baja entalpía) como fuente de energía libre de carbono es una de las tareas del Instituto Geológico Polaco - Instituto Nacional de Investigación (Servicio Geológico Polaco). Estas actividades se llevan a cabo para evaluar los regímenes de temperatura en el contexto de la geología, la tectónica, la hidrogeología y la influencia antropogénica locales, proporcionando datos de referencia para el desarrollo de mapas de potencial geotérmico de baja temperatura y apoyando la descarbonización del sector energético.

En 2021, se perforaron cinco pozos en diversos lugares del país para considerar las diferentes condiciones naturales. Cada pozo cuenta con un intercambiador de calor con una sola tubería en U. En 2021, se realizaron mediciones de temperatura de prueba y pruebas de TRT, mientras que en 2022-2023 se realizaron mediciones regulares trimestrales para cada temporada del año. Resultados de la mayoría

La parte superficial del subsuelo, hasta unos 2-5 metros de profundidad, indica una fuerte relación entre su temperatura y las condiciones climáticas y meteorológicas. Además, esta zona de temperatura del subsuelo se denomina zona de cambios de temperatura diarios y estacionales.

La variabilidad de la temperatura bajo la superficie disminuye gradualmente con la profundidad y es menos dependiente de factores externos. A una profundidad de generalmente 15-25 metros, dependiendo de la ubicación, la temperatura se estabiliza y se acerca al valor de la temperatura ambiente promedio del aire en el lugar dado. Esta zona de temperatura del subsuelo, llamada zona de temperaturas neutras o transitorias, puede persistir hasta aproximadamente 50-60 metros de profundidad o incluso más. A mayor profundidad, la temperatura del subsuelo comienza a aumentar de acuerdo con el valor del gradiente geotérmico. Los valores de temperatura del subsuelo derivados de la investigación presentada en este documento también dependen en cierta medida de varios factores geo y antropogénicos, como las propiedades térmicas de las rocas, por ejemplo, la conductividad térmica, la presencia de acuíferos, las anomalías climáticas y la presencia de infraestructura subterránea.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Polaco - Instituto Nacional de Investigación, en el marco del Servicio Geológico Polaco, implementa una tarea continua denominada "Evaluación del potencial energético y las condiciones ambientales para apoyar el desarrollo sostenible de la energía geotérmica de baja temperatura". Esto incluye el registro y la medición de la temperatura, así como la realización de pruebas de las propiedades térmicas del subsuelo superficial en pozos de observación geológica realizados específicamente para este fin.

En general, el registro de temperatura de pozos se realiza para estudiar los cambios espaciales y temporales, según Davis et al. (2010), así como la distribución de la temperatura en el subsuelo a escala local y regional. Los datos de temperatura del subsuelo son cruciales para proporcionar datos de referencia para el desarrollo de los mapas de potencial geotérmico de baja temperatura elaborados por el PGI-NRI en el marco de proyectos internacionales como TransGeoTherm, Geothermal4PL y GeoPLASMA-CE, así como del proyecto nacional "Mapa del potencial geotérmico de baja temperatura de Polonia a escala 1:50 000. Etapa I - Tarea Continua", abreviado como MPGN. Los resultados de las mediciones de temperatura del subsuelo también son útiles para observar los cambios climáticos, según, por ejemplo, Bodri y Čermák (1997) y Chisholm y Chapman (1992), y para monitorear el rendimiento de los intercambiadores de calor de pozos y otras instalaciones geotérmicas de baja temperatura., por ejemplo según Aranzabal et al. (2019), Michalski y Klitzsch (2019), Beier et al. (2012) y Beier et al. (2013), caracterizando la dinámica del acuífero y estimando las propiedades térmicas del subsuelo según, por ejemplo, Moscoso Lembcke (2016) así como para algunos otros razones.

Este artículo presenta los resultados de una investigación realizada entre 2021 y 2023. El objetivo principal de los estudios fue identificar el régimen de temperatura del subsuelo en el contexto de la geología e hidrogeología locales y, en algunos casos, también de la influencia antropogénica. Los resultados de la investigación proporcionan datos para la elaboración de mapas de potencial geotérmico de baja temperatura en las zonas seleccionadas de Polonia. El objetivo general de la tarea del Servicio Geológico Polaco descrita en este artículo es apoyar el desarrollo y el uso de la energía geotérmica de baja temperatura como fuente de energía renovable en el contexto de la descarbonización de la economía nacional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación y construcción de los pozos de observación

En la primavera de 2021, se perforaron cinco pozos en diferentes lugares de Polonia: Bielsko-Biała, Budzów, Halinów, Wojcieszycze y Wrocław. Su posición, así como la de las hojas de mapas de potencial de baja temperatura, se muestra en la Figura 1. Esta selección garantiza la realización de observaciones en diversas condiciones naturales. Cada pozo de observación tiene instalado un intercambiador de calor de pozo (BHE), es decir, un único tubo en U lleno de una solución acuosa de propilenglicol, la llamada salmuera. Los pozos no se utilizan para obtener energía térmica del subsuelo, pero su diseño permite realizar mediciones de temperatura puntual, registros de temperatura y pruebas de respuesta térmica (TRT). Cada tubo en U está formado por dos secciones de tubería de PE con un diámetro interior de 40 (mm), conectadas en la parte inferior con un manguito soldado, constituyendo así un sistema hidráulico cerrado. Los extremos de las tuberías de PE se conducen a un pozo de inspección y se cierran con válvulas de bola, mientras que uno de ellos tiene un manómetro montado. El diámetro interior de los cinco pozos es de 140 mm y la profundidad total es de 99,0 metros. El espacio entre el BHE y la pared de cada pozo, a lo largo de toda su longitud, está inyectado con cemento de alta conductividad térmica, el llamado termocemento. El objetivo del inyectado es aislar los acuíferos, evitando la mezcla de diferentes tipos de agua, la entrada de fluidos en y a lo largo del pozo, así como la migración de cualquier sustancia desde la superficie del suelo. El objetivo principal del inyectado con termocemento es asegurar el mejor contacto térmico posible entre la solución en el tubo en U y el subsuelo (rocas y agua subterránea). La Figura 2 ilustra la construcción interna de los pozos de observación.

Figura 1: Ubicación de los pozos de observación y hojas de los mapas de potencial de baja temperatura en el mapa de contornos de Polonia.

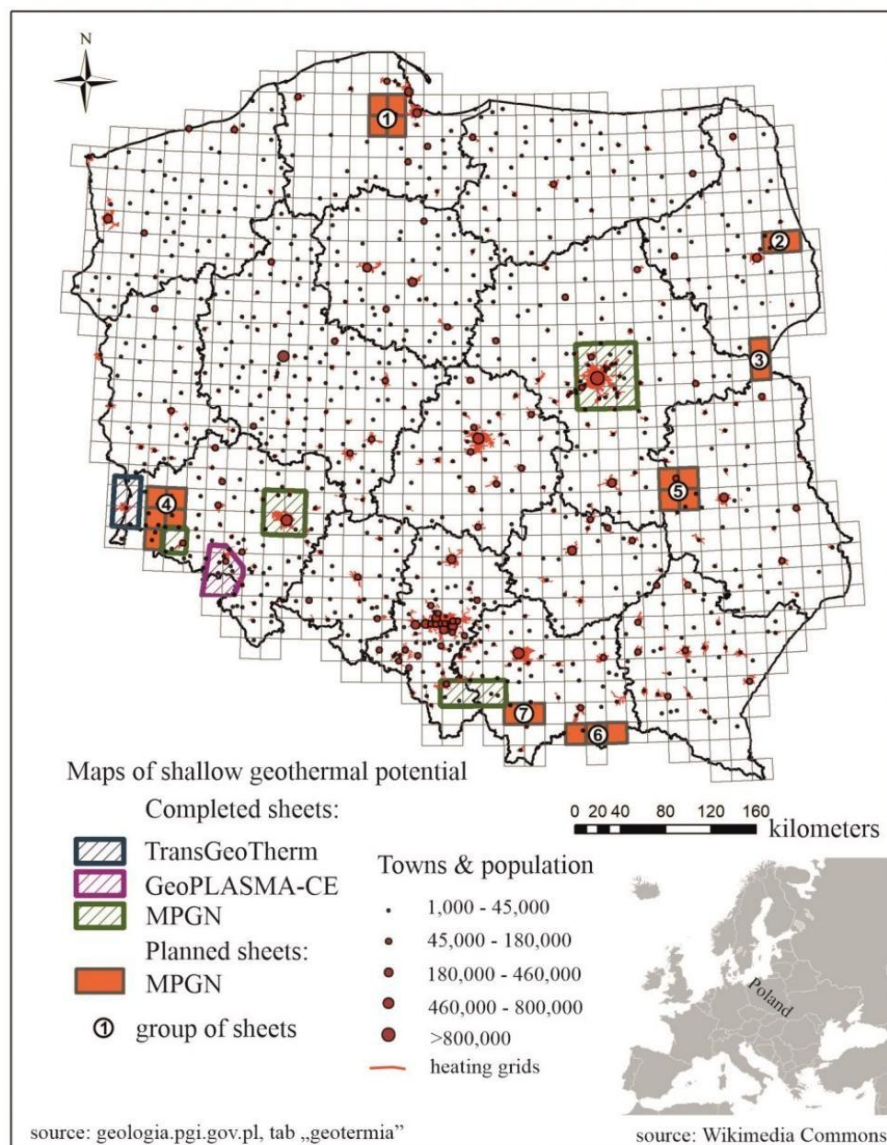
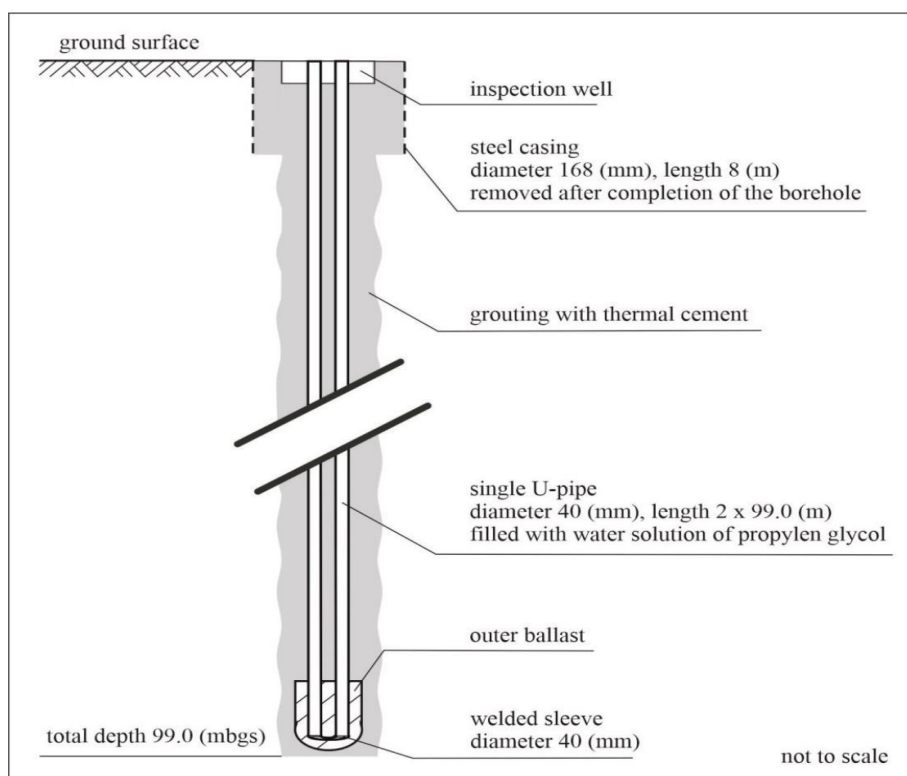


Figura 2: Esquema de construcción interna de los pozos de observación.



2.2 Geología e hidrogeología

Los pozos de observación estudiados se describen a continuación ordenados según su altitud (msnm), de mayor a menor. Las características generales de los pozos de observación se presentan en la Tabla 1.

El pozo de observación TP-1 Wojcieszycze se encuentra en el suroeste de Polonia, en el voivodato de Baja Silesia, a unos 100 kilómetros al suroeste de Breslavia. El pozo se encuentra en la zona verde del pueblo, a una altitud de 426,75 msnm. Geológicamente, se sitúa en la parte occidental del Bloque Sudetico, dominado por el Macizo Izera-Karkonosze, que, según Kozłowski et al. (2016), constituye un basamento cristalino. El perfil del pozo contiene diversos tipos de granitoides y gneises. Las rocas duras suelen estar cubiertas por una fina capa de regolito. Las zonas fisuradas y meteorizadas del macizo cristalino forman tres acuíferos delgados, dos de los cuales están confinados en la base; sin embargo, sus propiedades hidrogeológicas son bastante limitadas.

El pozo de observación TP-1 Bielsko-Biała se encuentra en el sur de Polonia, en el voivodato de Silesia, a unos 50 kilómetros al sur de Katowice. El pozo se ubica en una zona urbanizada a una altitud de 349,14 msnm. Geológicamente, se ubica en la parte sur del Bloque de Alta Silesia, denominado Domo de Bielsko-Biała. Este está formado por rocas cristalinas del Neoproterozoico y rocas metaclásicas del Ediacárico, cubiertas por la serie sedimentaria más reciente de los Cárpatos Exteriores, como lo demostraron Golonka et al. (2009).

La parte superior del perfil del pozo comprende rocas cuaternarias de unos 10 metros de espesor, incluyendo regolito, arenas y gravas. Debajo se encuentra una densa serie de lutitas oscuras y margosas del Cretácico con capas intercaladas de areniscas. La formación Cretácica se sustenta en areniscas, lutitas y calizas del Jurásico, cuya parte superior se encuentra muy por debajo del fondo del pozo. El acuífero confinado está formado por rocas cretácicas de porosidad fisurada, con su parte superior a 24,0 mbgs.

El pozo de observación TP-1 Budzów se encuentra en el sur de Polonia, en el voivodato de Pequeña Polonia, a unos 35 kilómetros al suroeste de Cracovia. El pozo se encuentra en la zona verde del pueblo, a una altitud de 334,58 msnm. Geológicamente, se encuentra dentro de la serie sedimentaria de la Manto Magura, la unidad geológica más grande de los Cárpatos Exteriores en Polonia. Esta unidad geológica consiste principalmente en rocas del Paleógeno y Cretácico Superior, que comprenden las capas intercaladas de lutitas y areniscas llamadas flysch de los Cárpatos, como lo demostraron Golonka et al. (2009). En la parte superior del perfil del pozo se encuentra la capa de 9 metros de espesor de las arenas y tills cuaternarios. Debajo de la serie de flysch del Paleógeno se encuentra la capa intercalada de areniscas gris pálido con calcita, areniscas con glauconita y lutitas gris oscuro. El acuífero confinado se forma dentro de las areniscas y lutitas porosas fisuradas presentes a una profundidad de aproximadamente 15,0 mbgs.

El pozo de observación TP-1 Wrocław se encuentra en el suroeste de Polonia, en el voivodato de Baja Silesia, en la parte sur de la ciudad. El pozo se encuentra en una zona verde a las afueras del centro de la ciudad, a una altitud de 125,21 msnm. Geológicamente, se encuentra en la zona relativamente estrecha del Horst del Óder Medio, cubierta de depósitos más recientes. La parte superior de los depósitos, según Badura et al. (2004), está formada por sedimentos del Cenozoico. El perfil del pozo abarca diversos sedimentos cuaternarios de unos 44 metros de espesor, compuestos por capas intercaladas de arenas finas y gruesas, gravas, margas y tills de origen fluvio-glacial. Una capa de arenas gruesas y gravas forma el acuífero libre. Los sedimentos neógenos subyacentes se componen principalmente de arcillas y tills, así como, en menor medida, de arenas y gravas que forman el acuífero confinado.

El pozo de observación TP-1 Halinów se encuentra en el centro de Polonia, en el voivodato de Mazovia, a unos 25 kilómetros al este de la aglomeración de Varsovia. El pozo se ubica en un terreno baldío en una zona industrial a una altitud de 117,94 msnm. Geológicamente, se encuentra entre los sedimentos cuaternarios y neógenos depositados sobre rocas mucho más antiguas de la Plataforma de Europa del Este. Los sedimentos cuaternarios consisten en tills, arenas y gravas de origen fluvio-glacial. Su espesor en el pozo alcanza los 24,0 metros. Estos se sustentan sobre depósitos del Paleógeno, con predominio de capas arcillosas y algunas delgadas intersecciones de gravas y margas. El acuífero poroso confinado está formado por gravas de 10 metros de espesor, cuya parte superior se encuentra a 14,0 mbgs.

Tabla 1: Características generales de los pozos de observación.

Parámetro Pozo de observación	Altitud (msnm)	Profundidad (mbgs)	Tipos de roca*: edad, litoestratigrafía, rango de profundidad (mbgs)	Acuíferos*: rango de profundidad (mbgs), tipo hidráulico, tipo de matriz, profundidad hasta el nivel freático (mbgs), espesor excluyendo acuicludos intercalados (metros)	Tipo de uso del suelo
TP-1 Wojcieszycze	426.75	99.0	Q, regolito, tills, 0,0-8,0 Pt + C augen oscuro y gneises bandeados con intrusiones de granitoides, 8,0->99,0	35.0-36.0, u, f, NN, 1,0 55.0-56.0, c, f, NN, 1,0 60.0-61.0, c, f, NN, 1,0	zona rural, verde
TP-1 Bielsko-Biala	349.14	99.0	Q, arenas, gravas y regolitos, 0,0-12,0 Cr, capas intercaladas de areniscas, lutitas oscuras y lutitas margosas, 12,0->99,0	24.0-NN, c, fp, NN, NN	zona urbana, edificada
TP-1 Budzów	334.58	99.0	Q, arenas y gravas, 0,0-9,0 P, capas intercaladas de areniscas finas y gruesas y gris oscuro esquistos, 9,0->99,0	15.0-NN, c, fp, 1.77, NN	rural, área verde
TP-1 Breslavia	125.21	99.0	Q, capas intercaladas de tills, gravas y arenas medianas y gruesas, 0,0-44,0 Ng, arcillas, margas, arenas y gravas, 44,4->99,0	6.0-16.0, c, p, NN, 8.0 76.0-78.0, c, p, NN, 2.0 86.0-NN, c, p, NN, NN	urbano, área verde
TP-1 Halinów	117,94	99.0	Q, tills, arenas medias y arenas gruesas con gravas, 0,0-24,0 Ng, arcillas, arcillas con inserciones de margas, 24,0->99,0	14.0-24, c, p, 3.5, 10.0	industrial, yermo

*El orden de descripción es de arriba a abajo del pozo.

Estratigrafía: Q – Cuaternario, Ng – Neógeno, Pg – Paleógeno, Cr – Cretácico, J – Jurásico, C – Carbonífero, Pt – Proterozoico

Tipo hidráulico del acuífero: u – libre, c – confinado

Tipo de matriz del acuífero: p – poroso, f – fisurado, fp – fisurado-poroso
NN – valor o parámetro desconocido

2.3 Mediciones de temperatura

En 2022, tras un periodo de inactividad de entre cuatro y seis semanas, se realizaron una serie de mediciones de prueba y pruebas TRT en todos los pozos de observación. Desde 2023, se han registrado temperaturas en cada pozo regularmente en primavera, verano, otoño e invierno. Inicialmente, se utilizaron termómetros con sensor PT100 y cinta métrica. Inicialmente, las mediciones de temperatura puntual dentro del tubo en U se tomaron con resoluciones variables para diferentes intervalos de profundidad, es decir, de 0,5 a 1,0 metros para los 20 metros superiores del perfil de temperatura y de 2,0 a 5,0 metros por debajo. La desventaja de este método fue su limitación a mediciones puntuales. Posteriormente, se implementó un conjunto portátil de dos registradores de Solinst Canada Ltd., el Levellogger 5 y el Barologger 5 modelo 3001. Cada uno de ellos está equipado con sensores de temperatura y presión; sin embargo, el primero se utiliza para mediciones en el fondo del pozo, mientras que el segundo para mediciones de las condiciones ambientales en la superficie del terreno. Los sensores de ambos

Los registradores son calibrados por el fabricante y no requieren calibración antes de cada serie de mediciones. El software Levellogger 4.6.3 permite la compensación barométrica de los registros de medición de ambos registradores, como se describe en la Guía del usuario de la serie Levellogger de Solinst Canada Ltd. (2023). Los registradores Levellogger 5 y Barologger 5 permiten modificar de forma flexible la frecuencia de muestreo, lo que optimizó gradualmente la metodología de registro de temperatura. El registrador Levellogger 5 se bajó al tubo en U con la cuerda de Kevlar a una velocidad media de aproximadamente 4 m/min, mientras que la frecuencia de muestreo de temperatura se ajustaba habitualmente a 4 s. De esta forma, las mediciones de temperatura dependientes de la profundidad producen resultados prácticamente continuos, lo que permite un análisis detallado.

2.4 Estimación de la temperatura media del subsuelo de un intercambiador de calor de pozo.

Uno de los factores decisivos para la tasa de intercambio de calor y el rendimiento general del BHE es la temperatura del subsuelo en sus proximidades. La temperatura del subsuelo puede considerarse la temperatura media inalterada de la pared del pozo, calculada mediante un promedio ponderado de las temperaturas de las zonas térmicas individuales. En las zonas someras del subsuelo, hasta aproximadamente 100 mbgs, la temperatura suele verse influenciada por los siguientes factores:

- la temperatura media anual en la superficie del suelo, es decir, las temperaturas diarias y estacionales,
- zonas de temperatura transitoria (zona estacional, variaciones a largo plazo de la temperatura media anual de la superficie y flujo de aguas subterráneas poco profundas afectadas por variaciones estacionales de temperatura),
- la zona dependiente del gradiente geotérmico influenciada por los siguientes procesos de transporte de calor:
 - o conducción térmica relacionada con el flujo de calor terrestre,
 - o advección térmica en presencia de flujo de agua subterránea,
 - o convección térmica en presencia de cuerpos de agua subterránea espesos y altamente permeables.

La metodología para estimar la temperatura media del subsuelo a lo largo de un BHE comprende las siguientes etapas de procedimiento primarias:

- evaluación y validación de mediciones de temperatura,
- agregación de la temperatura media anual de la superficie,
- examen de los gradientes de temperatura en las posiciones individuales de los pozos de acuerdo con las principales zonas térmicas,
- formulación de modelos de gradiente de temperatura para las distintas zonas térmicas del subsuelo superior,
- cálculo de la temperatura media basada en configuraciones predeterminadas y definidas explícitamente.

La temperatura media anual de la superficie del suelo, denominada T_0 , sirve como punto de partida en este enfoque. Para simplificar, se puede suponer que se trata de la temperatura media anual del aire en el área de un pozo de observación determinado. Este cálculo de la temperatura subsuperficial resultante, desarrollado por Görtz et al. (2019), implica la suma de los gradientes correspondientes a distintas zonas de profundidad:

El gradiente térmico que abarca desde la temperatura superficial media anual hasta la temperatura constante T_1 en la base de la zona estacional a la profundidad z_1 . Si existen acuíferos subterráneos someros en los 20 metros superiores del subsuelo, T_1 puede estimarse mediante la temperatura media anual del agua subterránea en el fondo del acuífero (z_1):

$$\text{grad}T_{0,1} = \frac{T_1 - T_0}{z_1}$$

donde: $\text{grad}T_{0,1}$, T_0 , T_1 , z_1 son el gradiente de la zona estacional, la temperatura superficial media anual, la temperatura constante en el fondo de la zona de temperatura subsuperficial diaria y estacional, la profundidad hasta el fondo de la zona de temperatura subsuperficial diaria y estacional, respectivamente.

- El gradiente térmico desde T_1 hasta la temperatura T_2 en la base de la zona de temperatura transitoria a la profundidad z_2 :

$$\text{grad}T_{1,2} = \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1}$$

donde: las variables T1, z1 significan lo mismo que en la ecuación (1) y gradT1,2, T2, z2 son el gradiente de la zona transitoria, la temperatura en el fondo de la zona de temperatura subterránea transitoria y la profundidad hasta la base de la zona de temperatura subterránea transitoria, respectivamente

El gradiente geotérmico aplicable a profundidades superiores a z2 indica un régimen de temperatura estable. Este gradiente geotérmico caracteriza las condiciones de temperatura estables conductivas o puede verse influenciado por zonas de agua subterránea circulante profunda que conducen a condiciones estables.

$$\text{grad}T = \frac{q}{TC}$$

donde: gradT, q, TC son el gradiente geotérmico, el flujo de calor terrestre y la conductividad térmica del subsuelo, respectivamente.

Dado que la longitud total de un BHE, denotada como "l", abarca todas las zonas térmicas dentro del modelo del subsuelo, la temperatura media ponderada del subsuelo se calcula de la siguiente manera:

$$T_{\text{mean}}(l) = T_0 + \text{grad}T_{0,1} \cdot \frac{z_1^2}{l} + \text{grad}T_{1,2} \cdot \frac{(z_2 - z_1)^2}{l} + \text{grad}T \cdot \frac{(l - z_2)^2}{l}$$

donde: Tmean, T0, gradT0,1, z1, l, gradT1,2, z2 son la temperatura media del subsuelo, la temperatura media anual de la superficie, el gradiente de la zona estacional, la profundidad en la base de la zona estacional, la longitud del BHE, el gradiente de la zona transitoria y la profundidad hasta la base de la zona transitoria, respectivamente.

3. RESULTADOS

Los patrones de temperatura dependientes de la profundidad medidos para los pozos de observación estudiados son en gran medida similares en el caso de 2022 y 2023. Los parámetros estadísticos de los resultados de la medición de temperatura para los pozos individuales para 2022 y 2023 se presentan en la Tabla 2, mientras que la Figura 2 muestra los patrones del registro de temperatura dependiente de la profundidad para 2023.

Los valores de temperatura medidos en todos los pozos de observación en 2022 oscilaron entre 5,70 y 15,90 °C, mientras que en 2023 oscilaron entre 6,00 y 18,66 °C. Para cada perfil de temperatura, se pueden identificar las diferentes zonas de profundidad asociadas con la variabilidad de la temperatura del subsuelo en función de diversos factores. Los valores extremos de temperatura mínima y máxima se midieron en invierno y verano, respectivamente, hasta una profundidad de aproximadamente 2-5 mbgs. Esta zona cercana a la superficie es la que más depende de factores externos, como el clima y la meteorología, por lo que se denomina zona de cambios diarios y estacionales de la temperatura del subsuelo. La diferencia máxima de los valores de temperatura entre las estaciones de invierno y verano, que alcanzó los 12,40 (°C), se registró en el pozo de observación TP-1 Halinów en 2023, mientras que la más baja de 7,99 (°C) se midió en el pozo TP-1 Wojcieszycze en 2022. En general, la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas para todos los pozos estudiados fue mayor en 2023 que en 2022.

Debajo, la temperatura está disminuyendo y muestra diferencias de temperatura gradualmente menores entre los valores extremos. A una profundidad de aproximadamente 15-25 (mbgs), dependiendo del pozo, los valores de temperatura alcanzan la llamada zona de temperaturas de transición o neutrales donde la temperatura del subsuelo es cercana al valor promedio de la temperatura atmosférica anual del aire para una ubicación dada, sin embargo, muestra una pequeña variabilidad, es decir, puede aumentar o disminuir ligeramente. El espesor de esa zona es muy diferente y varía mucho entre los pozos de observación individuales. Debajo, la temperatura del subsuelo normalmente aumenta de acuerdo con el valor del gradiente geotérmico local; sin embargo, este efecto no es bien visible para todos los pozos estudiados.

Tabla 2: Características estadísticas de los resultados de las mediciones de temperatura (°C) en los pozos de observación para los años 2022 y 2023.

Pozo de observación, año	Mínimo	Máximo	T _{máx} - T _{mín}	Promedio	Mediana	desviación estándar
TP-1 Wojcieszycze, 2022	7.40	15.39	7.99	10.07	10.00	0.21
TP-1 Wojcieszycze, 2023	7.80	17.85	10.05	10.09	9.94	0.56
TP-1 Bielsko-Biała, 2022	7.20	15.68	8.48	11.27	10.93	0.33
TP-1 Bielsko-Biała, 2023	8.01	18.66	10.65	11.53	10.92	1.10
TP-1 Budzów, 2022	5.70	14.88	9.18	10.20	10.07	0.34
TP-1 Budzów, 2023	6.13	17.10	10.97	10.08	9.94	0.51
TP-1 Breslavia, 2022	7.20	15.92	8.72	10.73	10.65	0.29
TP-1 Breslavia, 2023	6.84	15.81	8.97	10.76	10.61	0.29
TP-1 Halinów, 2022	6.00	15.90	9.9	9.73	9.35	0.69
TP-1 Halinów, 2023	6.00	18.40	12.40	9.52	9.28	0.41



En el pozo de observación TP-1 Wojcieszycze, tanto en 2022 como en 2023, la zona de temperaturas diarias y estacionales alcanzó aproximadamente 20 mbps, mientras que la zona de temperaturas neutras continuó hasta aproximadamente 60 mbps. Por debajo, se observa un ligero aumento de la temperatura. En el pozo de observación TP-1 Bielsko-Biała, la zona de temperaturas diarias y estacionales en 2022 alcanzó aproximadamente 13 mbps, mientras que en 2023 fue más profunda y alcanzó aproximadamente 30 mbps. Esta es una diferencia bastante grande que podría deberse no solo a las condiciones naturales (diferentes temperaturas del subsuelo en 2022 y 2023), sino también, en gran medida, al método de perfilado de temperatura en el pozo. Este efecto también podría ser visible en menor medida en otros pozos estudiados.

Debajo se observó la zona de temperaturas neutras.

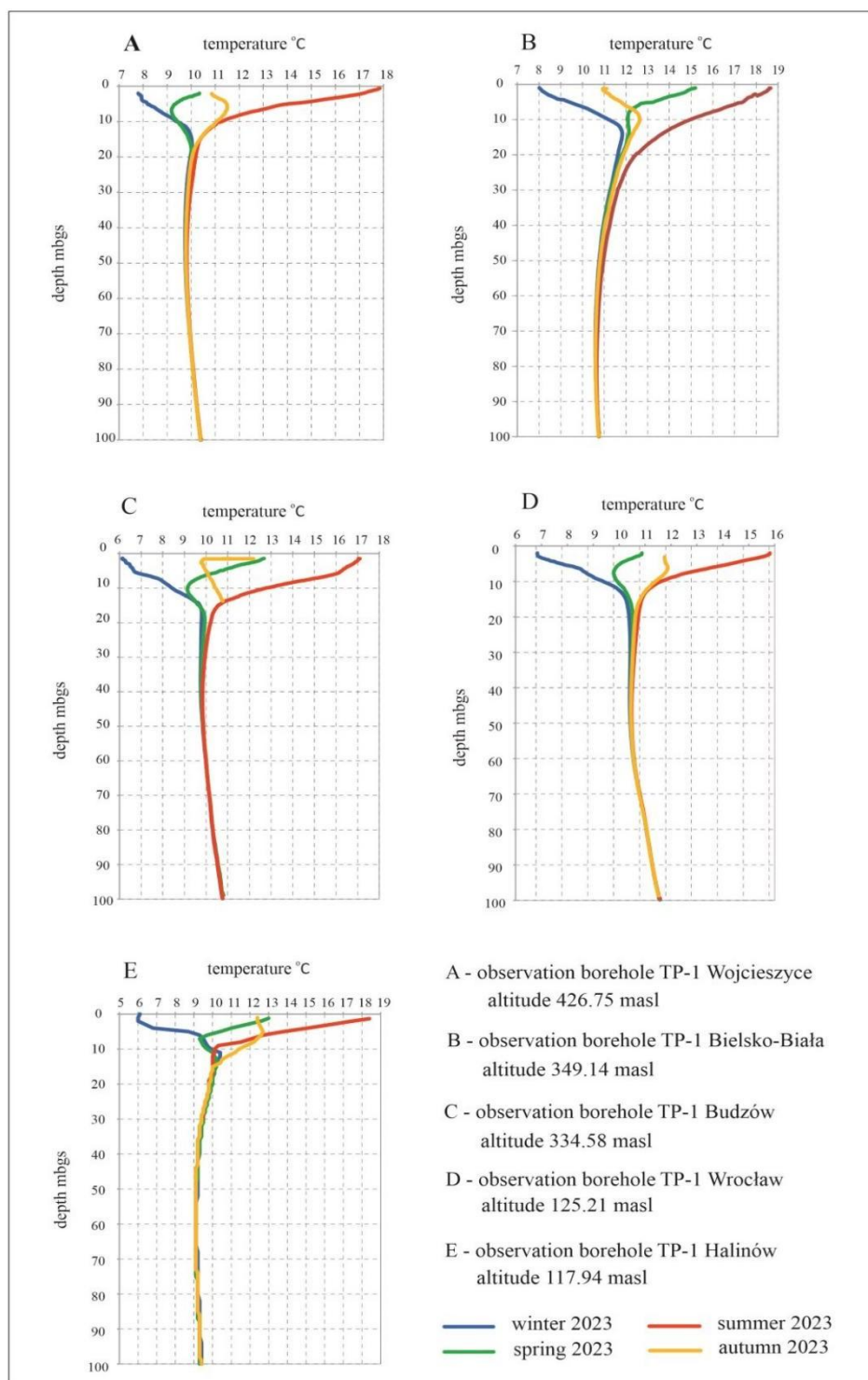
En el pozo de observación TP-1 Budzów, la zona de temperaturas diarias y estacionales descendió hasta aproximadamente 15 (mbgs) en 2022 y 25 (mbgs) en 2023. Debajo de la zona de temperaturas neutras se observó un crecimiento de la temperatura del subsuelo a profundidad de aproximadamente 50 (mbgs). Para el pozo de observación TP-1 Wrocław, la zona de temperaturas diarias y estacionales alcanzó aproximadamente 12 (mbgs) en 2022 y 25 (mbgs) en 2023. Por debajo de la zona de temperaturas neutras se observó que la temperatura del subsuelo comenzó a crecer a la profundidad de aproximadamente 55 (mbgs). Para el pozo de observación TP-1 Halinów, la zona de temperaturas diarias y estacionales alcanzó aproximadamente 25-30 (mbgs) en 2022 y 15 (mbgs) en 2023. Por debajo de la zona de temperaturas neutras se observó, sin embargo, no se puede observar un crecimiento distintivo de la temperatura para este pozo de observación. Las características de los perfiles de temperatura estacional para los pozos de observación estudiados para 2022 y 2023 se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Características de los perfiles de temperatura estacionales de los pozos de observación estudiados para 2022 y 2023.

Observación pozo, año	Rango de profundidad aproximado diario y estacional temperaturas zona (mbgs)	Tipos de rocas	Rango de profundidad aproximado del neutro zona de temperaturas (mbgs)	Tipo de rocas Inicio	aproximado de Crecimiento de la temperatura según el valor del gradiente geotérmico (mbgs)	Tipos de rocas
TP-1 Wojcieszycze, 2022	0 - 20	regolito y gneises	20 - 60	gneises con intrusiones de granitos	60	gneises con intrusiones de granitos
TP-1 Wojcieszycze, 2023	0 - 20	regolito y gneises	20 - 60	gneises con intrusiones de granitos	60	gneises con intrusiones de granitos
TP-1 Bielsko-Biała, 2022	0 - 13	arenas, gravas, regolito	13 - 80	areniscas y lutitas	80	areniscas y lutitas
TP-1 Bielsko-Biała, 2023	0 - 30	arenas, gravas, regolito areniscas y lutitas	30 - 80	areniscas y lutitas	80	areniscas y lutitas
TP-1 Budzów, 2022	0 - 15	arenas, gravas, regolito	15 - 50	areniscas y lutitas	50	areniscas y lutitas
TP-1 Budzów, 2023	0 - 25	arenas, gravas, regolito areniscas y lutitas	25 - 50	areniscas y lutitas	50	areniscas y lutitas
TP-1 Breslavia, 2022	0 - 12	labranza, gravas, arenas	12 - 55	labranza, gravas, arenas arcillas, margas, arenas, gravas	55	arcillas, margas, arenas, gravas
TP-1 Breslavia, 2023	0 - 25	labranza, gravas, arenas	25 - 55	labranza, gravas, arenas arcillas, margas, arenas, gravas	55	arcillas, margas, arenas, gravas
TP-1 Halinów, 2022	0 - 25	labranza, gravas, arenas	25 - NN	arcillas, margas, arenas	NN	arcillas, margas, arenas
TP-1 Halinów, 2023	0 - 15	labranza, gravas, arenas	15 - NN	arcillas, margas, arenas	NN	arcillas, margas, arenas

NN- valor desconocido

Figura 2: Valores de temperatura del subsuelo dependientes de la profundidad para los pozos de observación en 2023.



Los valores de temperatura promedio presentados en la Tabla 2 son la media aritmética calculada para todos los perfiles de pozo. El promedio
 Los valores de temperatura presentados en la Tabla 4 provienen de cálculos según la Ecuación (4), que considera zonas térmicas determinadas con base en las tendencias de aumento de temperatura en los perfiles de temperatura. Las diferencias entre las medias de 2022 y 2023 para el pozo de observación TP-1 Wrocław son las siguientes:

- TP-1 Wrocław, en 2022: ponderado aritméticamente = -0,34,
- TP-1 Wrocław, en 2023: ponderado aritméticamente = -0,14.

Los promedios ponderados calculados según la Ecuación (4) son mayores. Los autores creen que esto se debe al aumento de la ponderación de la parte del perfil donde el gradiente geotérmico tiene mayor impacto en el aumento de temperatura.

Tabla 4: Valores medios de la temperatura del subsuelo del pozo TP-1 Wrocław y resultados del cálculo con el uso de la ecuación (4).

Pozo, año	T0 (°C)	T1 (°C)	z1 (m)	T2 (°C)	z2 (m)	q (mW/m ²)	TC (W/m ² K)	Tmedia (°C)
TP-1 Breslavia, 2022	9.7	10.90	12	10.60	55	88	2.3	11.07
TP-1 Breslavia, 2023	9.7	10.54	25	10.49	55	88	2.3	10.90

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados de las mediciones para la zona de temperaturas diarias y estacionales que alcanza la profundidad de hasta aproximadamente 2-5 (mbgs) revelan una fuerte relación entre su temperatura y las condiciones climáticas y meteorológicas, como la temperatura del aire atmosférico, la precipitación, la radiación solar, etc. que fue observada por muchas investigaciones, por ejemplo, Majorowicz y Śafanda (2023), Banks (2012). El régimen de temperatura del subsuelo dentro de esta zona subterránea más superficial depende en gran medida de uso de la tierra. Los entornos geológicos parecen desempeñar un papel menos importante. Por debajo, dentro de la llamada zona de temperaturas transitorias o neutrales, la variabilidad de la temperatura del subsuelo disminuye. Por debajo, la temperatura del subsuelo comienza a crecer y depende predominantemente del valor del gradiente geotérmico que fue demostrado, por ejemplo, por Majorowicz y Grad (2020) y Majorowicz (1973). Cabe destacar que la forma de los perfiles de temperatura inferidos de la investigación realizada puede estar significativamente influenciada por varios factores geo y antropogénicos, como las propiedades térmicas de las rocas, por ejemplo, la conductividad térmica, la presencia de acuíferos, anomalías climáticas y la presencia de infraestructura subterránea. Factores antropogénicos, como la influencia de la isla de calor urbana en la temperatura subterránea, fueron estudiados por Worsa-Kozak y Arsen (2023) y Klonowski (2021) en Wrocław y podrían observarse en el pozo TP-1 Wrocław. Este efecto también podría estar presente en el caso del pozo TP-1 Halinów. Los regímenes térmicos dentro de las zonas de temperaturas neutras y las condiciones geológicas, tectónicas e hidrogeológicas subterráneas más profundas también son importantes para la formación del régimen térmico del subsuelo.

El registro de la temperatura del subsuelo en los pozos, realizado por el Instituto Geológico Polaco - Instituto Nacional de Investigación, es una investigación pionera en Polonia que contribuye al desarrollo de la red nacional de observación e investigación. En los próximos años, está previsto perforar otros cinco pozos en diversas regiones del país, como Baja Silesia, Pomerania, Podlaquia y la región de Lublin.

AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada forma parte de la tarea del PGS titulada: "Mapa del potencial geotérmico de baja temperatura de Polonia en escala 1:50 000. Etapa I - tarea continua", llamada abreviada MPGN, que es realizada por los empleados del PGI-NRI con base en una orden del Ministerio de Clima y Medio Ambiente y financiada por el Fondo Nacional para la Protección del Medio Ambiente y la Gestión del Agua.

Los autores reconocen y expresan su gratitud a los siguientes colegas (enumerados a continuación en orden alfabético de sus apellidos) del PGI-NRI por su ayuda para realizar el trabajo de campo y discutir las ideas presentadas en este artículo, es decir, Paweł Brytan, Linda Chudzik, Tomasz Gagulski, Bolesław Judek, Anna Krzonkalla, Adrianna Maćko, Kamil Pawelec, Weronika Pratkowiecka, Grzegorz. Ryżyński, Marta Szlaska, Małgorzata Tott, Kajetan Wczelik, Przemysław Wojtaszek, Urszula Wyrwalska y Jarosław Zawłocki.

ACRÓNIMOS Y UNIDADES SELECCIONADAS

Intercambiador de calor de pozo BHE

°C grados Celsius

K grados Kelvin

m metros

msnm metros sobre el nivel del mar

mbgs metros bajo la superficie del suelo

PGI-NRI Instituto Geológico Polaco – Instituto Nacional de Investigación

PGS Servicio Geológico Polaco

REFERENCIAS

- Aranzabal N., Martos J., Steger H., Blum P. y Soret J.: Medidas de temperatura a lo largo de un intercambiador de calor de pozo vertical: una comparación de métodos, *Renewable Energy* 143, (2019), 1247-1258.
- Badura J., Przybylski B. y Zuchiewicz W.: Evolución Cenozoica de la Baja Silesia, SO de Polonia: Una nueva interpretación a la luz de la topografía subcenozoica y subcuaternaria, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 1, No.3 (135), (2004), 7-29.
- Banks D.: Introducción a la termogeología. Calefacción y refrigeración geotérmica. 2.ª edición, Wiley-Blackwell, Chichester (2012).
- Beier RA, Acuña J., Mogensen P. y Palm B.: Perfiles de temperatura verticales y resistencia del pozo en un sistema de calentamiento de pozo en forma de U. Intercambiador, *Geotermia* 44, (2012), 23– 32.
- Beier RA, Acuña J., Mogensen P. y Palm B.: Resistencia del pozo y perfiles de temperatura verticales en el sistema de calentamiento coaxial del pozo. intercambiadores, *Energía Aplicada* 102, (2013), 665–675.
- Bodri L. y Čermák V.: Reconstrucción de cambios climáticos remotos a partir de las temperaturas de los pozos, *Cambio global y planetario* 15, (1997), 47-57
- Chisholm TJ y Chapman DS: Cambio climático inferido a partir del análisis de las temperaturas de los pozos. Un ejemplo de la región occidental. Utah, *Revista de investigación geofísica*, vol. 97, núm. B10, (1992), 155-175.
- Davis MG, Harris RN y Chapman DS: Repetir las mediciones de temperatura en pozos del noroeste de Utah vincula el suelo y Cambios de temperatura del aire en la escala de tiempo decenal, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115 B05203, (2010), 1-12.
- Golonka J., Pietsch K., Marzec P., Stefaniuk M., Waśkowska A. y Cieszkowski M.: Tectónica de la parte occidental de los Cárpatos Exteriores polacos, *Geodinamica Acta*, 22/1-2, (2009), 81-97.
- Görz I., Heiermann M., Götzl G., Steiner C., Ciapala B., Hofmann K.: Directrices evaluadas sobre flujos de trabajo y métodos armonizados para áreas urbanas y no urbanas, Entregable D.T2.3.4, GeoPLASMA-CE, (2019), 1-67.
- Klonowski MR: Perturbaciones antropogénicas de la temperatura del subsuelo en la aglomeración de Wrocław, Libro de resúmenes ampliados, 7.º Congreso Polaco de Geotermia, (2021) 147-150.
- Kozłowski A., Ilnicki S., Matyszczyk W. y Marcinowska A.: Fenómenos magmáticos y posmagmáticos en el granito de Karkonosze y su envoltura metamórfica (Sudetes occidentales, suroeste de Polonia), *Acta Geologica Polonica*, vol. 66, núm. 3, (2016), 451–471.
- Majorowicz JA: Flujo de calor en Polonia y su relación con la estructura geológica, *Geothermics* Vol. 2, No. 1, (1973), 24-28.
- Majorowicz J. y Grad M.: Diferencias entre los mapas recientes de flujo de calor de Polonia y las restricciones de edad termosísmica y tectónica profunda, *Revista internacional de flujo de calor terrestre y geotermia aplicada*, vol. 3, n.º 1, (2020), 11-19.
- Majorowicz J. y Šafanda J.: Calor geotérmico superficial en el oeste de Canadá: el impacto del calentamiento climático cambia con el tiempo y la profundidad, *Boletín de Geografía. Serie de Geografía Física*, No. 24 (2023): 39–53.
- Michalski A. y Klitzsch N.: Primera aplicación de campo de módulos de sensores de temperatura para la detección del flujo de agua subterránea cerca de pozos de calor intercambiador, *Energía Geotérmica*, (2019), 1-16.
- Moscoco Lembcke LG, Roubinet D., Gidel F., Irving J., Pehme P. y Parker BL: Análisis analítico de experimentos de pozos para la estimación de propiedades térmicas del subsuelo, *Advances in Water Resources* 91, (2016), 88–103.
- Guía del usuario de la serie Levellogger 10 de agosto de 2023, Solinst Canada Ltd.
- Worsa-Kozak M., Arsen A.: Isla de calor urbana de aguas subterráneas en Wrocław, Polonia, *Land* 12, 658, (2023), 1 – 16.