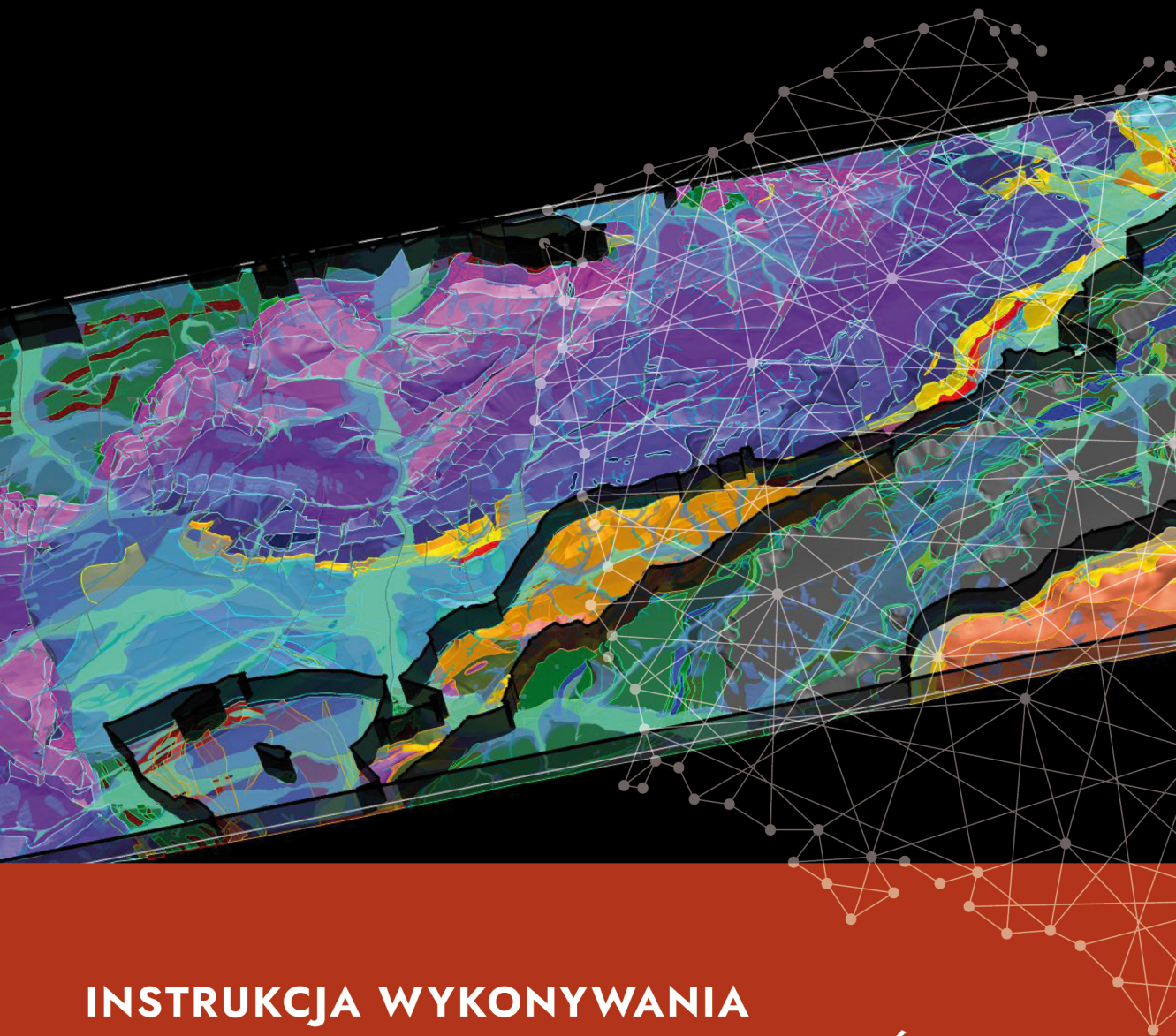




INSTRUKCJA WYKONYWANIA MAP POTENCJAŁU I UWARUNKOWAŃ ŚRODOWISKOWYCH GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy



Instrukcja wykonywania map potencjału i uwarunkowań środowiskowych geotermii niskotemperaturowej



Sfinansowano ze środków
**NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**

Redakcja naukowa:

Grzegorz Ryżyński, Wiesław Kozdrój, Marta Szlasa

Zespół autorski:

Grzegorz Ryżyński, Wiesław Kozdrój, Maciej Kłonowski, Mateusz Żeruń, Przemysław Wojtaszek, Aleksandra Łukawska, Marta Szlasa, Urszula Wyrwalska, Aleksander Kowalski, Adam Mydłowski, Jacek Kocyła, Tomasz Gągulski, Małgorzata Tott, Paweł Czarniak, Grzegorz Pacanowski, Edyta Majer, Marta Sokołowska, Marcin Lasocki, Szymon Ostrowski, Zbigniew Frankowski, Katarzyna Boniewska, Łukasz Nowacki, Jacek Chełmiński, Małgorzata Ziółkowska-Kozdrój, Jarosław Zawłocki, Karol Zawistowski, Izabela Samel, Anna Stawicka, Jakub Kobiela, Ewa Jagoda, Kajetan Wczelik, Krzysztof Majer

Redakcja, opracowanie typograficzne, skład:

Łukasz Borkowski, Agnieszka Byliniak

Projekt okładki:

Monika Cyrklewicz

© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2023

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	10
2. Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej w skali 1:50 000 i 1:10 000 – główne zbiory danych i zarys metodyki opracowania	15
3. Określenie metodyki sporządzania regionalnych map potencjału płytkiej geotermii w skali 1:50 000 – etapy realizacji	17
4. Zawartość bazy danych niezbędna do opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej	19
4.1. Dane archiwalne	19
4.2. Badania przewodności termicznej gruntów i skał	26
4.2.1. Pomiary przewodności termicznej w warunkach terenowych	28
4.2.2. Laboratoryjne pomiary przewodności termicznej gruntów	32
4.2.3. Laboratoryjne pomiary przewodności termicznej skał	34
4.3. Badania efektywnej przewodności termicznej metodą testu reakcji termicznej	41
4.4. Termopiezometry	42
4.5. Badania naturalnego rozkładu temperatury w płytkich partiach litosfery <i>in situ</i>	45
4.6. Badania geofizyczne	50
4.6.1. Archiwalne badania geofizyczne	52
4.6.2. Założenia metodyczne	52
4.6.3. Metoda wykonania prac polowych dla sondowań geoelektrycznych (VES) i tomografii elektrooporowej (ERT)	58
4.6.4. Metoda wykonania prac polowych przed badaniami sejsmicznymi	61
4.6.5. Projektowanie badań geofizycznych	62
5. Przygotowanie danych wejściowych i ich przetwarzanie w środowisku GIS	65
5.1. Definicja obszaru roboczego i przestrzeni roboczej	65
5.2. Górna granica modelu 3D: numeryczny model terenu	65
5.3. Dolna granica modelu 3D: minimalna obwódka topograficzna	65
5.4. Legenda zbiorcza, ustalenie serii geologiczno-termalnych (SGT)	66
5.5. Litologiczny profil syntetyczny	67
5.6. Kodowanie profili otworów wiertniczych i przekrojów geologicznych wg serii geologiczno-termalnych	68
5.7. Kontrola poprawności danych otworów wiertniczych	70
5.8. Wirtualne otwory wiertnicze	72
5.9. Sieć uskoków	73
5.10. Wyznaczanie powierzchniowego zasięgu serii geologiczno-termalnych	76
5.11. Geologiczny model strukturalny – relacyjny schemat przestrzenny serii geologiczno-termalnych	78
6. Kontrola jakości danych przetworzonych – wejściowych dla modelu bazowego 3D	79
7. Modelowanie geologiczne 3D na podstawie wyróżnionych serii geologiczno-termalnych	80
7.1. Dopasowanie granic do sąsiednich modeli 3D	83

8. Wykonanie i eksport siatek powierzchni granicznych serii geologiczno-geotermicznych	83
9. Synteza danych hydrogeologicznych – opracowanie siatki obliczeniowej	84
10. Opracowanie modelu parametrycznego: kodowanie wydzieleni litologiczno-petrograficznych w profilach otworów wiertniczych i przypisanie im wartości przewodności termicznej w stanie suchym i zawodnionym	88
11. Opracowanie map rozkładu średniej przewodności termicznej skał dla modelowanego obszaru i w określonych przedziałach głębokości podłoża skalnego	89
11.1. Obliczenie wartości średniej ważonej przewodności termicznej (wg miąższości warstw) dla każdej serii geologiczno-termicznej wyróżnionej w otworze wiertniczym	89
11.2. Podział zestawu danych średniej przewodności termicznej na obiekty punktowe dla każdej serii geologiczno-termicznej (SGT)	90
11.3. Interpolacja średniej przewodności termicznej skał w stanie suchym i zawodnionym metodą odwróconych odległości (IDW)	91
11.4. Kalkulacja średnich wartości przewodności termicznej skał podłoża w różnych przedziałach głębokości i opracowanie wynikowych map potencjału geotermii niskotemperaturowej	91
12. Eksport plików wynikowych i udostępnienie map potencjału geotermii niskotemperaturowej na portalu internetowym	95
13. Opracowanie map możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych	98
13.1. Definicja mapy	98
13.2. Wybór warunków do analizy i zebranie danych	101
13.3. Integracja danych	101
13.4. Przygotowanie mapy możliwości wykonania OWC	105
Literatura	107

SPIS RYCIN

Ryc. 1. Schemat działania gruntowych pomp ciepła systemu zamkniętego (z pionowym i poziomym wymiennikiem ciepła) i systemu otwartego w domu jednorodzinnym (źródło: materiały projektu GeoPLASMA-CE)	13
Ryc. 2. Schemat przedstawiający wpływ warunków geologicznych na moc energetyczną gruntowej pompy ciepła z wymiennikiem otworowym	15
Ryc. 3. Schemat etapów prac w celu wykonania modelu bazowego (3D), modelu parametrycznego oraz sporządzenia map potencjału geotermicznego	18
Ryc. 4. Analizator właściwości termicznych Tempos z zestawem sond igłowych do pomiarów przewodności termicznej różnych rodzajów materiałów	28
Ryc. 5. Pomiar przewodności termicznej <i>in situ</i> w gruntach czwartorzędowych	30
Ryc. 6. Pomiar przewodności termicznej gruntu w otworze za pomocą terenowej sondy igłowej typu Hukseflux	30
Ryc. 7. Analizatory właściwości termicznych Tempos i KD2 Pro z igłami typu RK do pomiaru przewodności termicznej skał	31
Ryc. 8. Pomiar przewodności termicznej łupków fliszowych w odswieżonym odsłonięciu	31
Ryc. 9. Wiercenie otworu pod sondę igłową w łupkach fliszowych	32
Ryc. 10. Pomiar przewodności termicznej gruntów spoistych w inkubatorze termicznym	33
Ryc. 11. Stalowy cylinder z widelkami do formowania próbek gruntów niespoistych	33
Ryc. 12. Pomiar sprawdzający w glicerynie	34
Ryc. 13. Pomiar przewodności termicznej gruntów niespoistych w inkubatorze termicznym	34
Ryc. 14. Wyniki laboratoryjnych pomiarów przewodności termicznej gruntów w zestawieniu z wytycznymi PORT PC (Łukawska i in., 2020)	37
Ryc. 15. Miernik przewodności termicznej TK04	37
Ryc. 16. Próbkki skał przygotowane do pomiarów przewodności termicznej miernikiem TK04	38
Ryc. 17. Sonda dyskowa typu HLQ z materiałem wzorcowym do pomiarów sprawdzających	38
Ryc. 18. Prasa dociskowa do pomiarów przewodności termicznej skał	40
Ryc. 19. Stacjonarna sonda FOX 50 do pomiaru przewodności termicznej w stanie ustalonym	41
Ryc. 20. Wiercenie termopiezometru TP-1 Wojcieszycie	43
Ryc. 21. Przygotowanie otworowego wymiennika ciepła do zapuszczenia do otworu	44
Ryc. 22. Poglądowy schemat rozkładu temperatur płytkiej partii górotworu. Źródło: projekt Managing Urban Shallow Geothermal Energy MUSE, projekt graficzny Monika Cyrklewicz	46
Ryc. 23. Wyniki profilowania temperatury w sposób dyskretny w piezometrze Wrocław W-1 i termopiezometrze TP-1 Wrocław w dniu 18.05.2022	49
Ryc. 24. Wyniki profilowania temperatury w sposób ciągły w termopiezometrze TP-1 Halinów (29.09.2022)	49
Ryc. 25. Zrzut ekranu oprogramowania Levellogger ze skompensowanym wykresem wynikowym profilowania w termopiezometrze TP-1 Wrocław	50
Ryc. 26. Profilowanie temperatury w termopiezometrze TP-1 Wrocław za pomocą rejestratora Solinst zapuszczanego na sznurku kevlarowym w dniu 29.09.2022	51
Ryc. 27. Obudowa termopiezometru TP-1 Wrocław	51
Ryc. 28. Podział na regiony geologiczno-inżynierskie (Majer i in., 2018)	53
Ryc. 29. Poglądowa mapa lokalizacji dokumentacji geoelektrycznych i sondowań VES na obszarze Polski dostępnych w bazie CBDG	54
Ryc. 30. Idea przejścia z modelu geoelektrycznego na model przewodności cieplnej	55

Ryc. 31. Interpretacja krzywej VES w korelacji do tabeli referencyjnej ze zdefiniowanymi wartościami przewodności termicznej	56
Ryc. 32. Przykład przeliczenia wartości przewodności cieplnej z danych litologicznych (otworu – La-TC) oraz z danych oporności (VES – La-VES)	57
Ryc. 33. Empiryczna zależność oporności elektrycznej fliszu od procentowej zawartości piaskowców	58
Ryc. 34. Uproszczony schemat pomiarowy dla metody pionowych sondowań elektrooporowych	59
Ryc. 35. Przykład różnych modeli geoelektrycznych wykorzystywanych w procesie interpretacji.	60
Ryc. 36. Schemat wykonany na potrzeby projektowania badań geoelektrycznych dla obszaru arkusza SMGP z uwzględnieniem danych otworowych i archiwalnych	63
Ryc. 37. Schemat projektowania badań dla obszaru arkusza SMGP z uwzględnieniem danych otworowych i archiwalnych danych geofizycznych	64
Ryc. 38. Przypisanie serii SGT w otworach oraz dalsza parametryzacja warstw litologicznych	70
Ryc. 39. Przykład zreinterpretowanego przekroju geologicznego z mapy SMGP dla pilotażowej mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru aglomeracji warszawskiej	71
Ryc. 40. Widok bazy danych GIS z naniesioną lokalizacją wygenerowanych otworów wirtualnych	74
Ryc. 41. Chmura wygenerowanych punktów reprezentujących spągi wydzieli SGT na podstawie otworów wirtualnych w rzucie poziomym. Widok w środowisku oprogramowania do modelowania 3D GoCAD/SKUA	74
Ryc. 42. Chmura wygenerowanych punktów reprezentujących spągi wydzieli SGT na podstawie otworów wirtualnych w rzucie pionowym. Widok w środowisku oprogramowania do modelowania 3D GoCAD/SKUA	75
Ryc. 43. Przekrój geologiczny SMGP	75
Ryc. 44. Autorski przekrój geologiczny utworzony na podstawie Bazy Otworowej z wygenerowanym szeregiem otworów wirtualnych	75
Ryc. 45. Przekrój zgeneralizowany i zaseriowany zgodnie z profilem syntetycznym z szeregiem otworów wirtualnych	76
Ryc. 46. Zdigitalizowany i zaseriowany przekrój SMGP z szeregiem otworów wirtualnych	76
Ryc. 47. Wyznaczanie powierzchniowego zasięgu serii geologiczno-termalnej 05 na obszarze Jelenia Góra w projekcie MPGN	77
Ryc. 48. Powierzchniowy zasięg serii geologiczno-termalnych (SGT) dla obszaru Jelenia Góra w projekcie MPGN	78
Ryc. 49. Schemat ideowy geologicznego modelu strukturalnego z wyróżnieniem relacji przestrzennych jednostek geologiczno-geotermicznych i typów kontaktów. Schemat ułatwia kodyfikację profili otworów wiertniczych zgodnie z odpowiednim dla modelowanego obszaru profilem syntetycznym	79
Ryc. 50 Schematyczny sposób uwzględniania wielowarstwowych systemów wodonośnych w algorytmie obliczeniowym potencjału geotermii niskotemperaturowej	85
Ryc. 51. Schemat sposobu tworzenia symbolu PETKOD w Bazie Otworowej	89
Ryc. 52. Przykład tworzenia symbolu PETKOD w Bazie Otworowej	89
Ryc. 53. Schemat ideowy kalkulacji średniej ważonej przewodności termicznej dla skał w stanie suchym (λ dry) i zawodnionym (λ H ₂ O sat.) na przykładzie profilu otworu wiertniczego składającego się z pięciu warstw litologicznych należących do trzech serii geologiczno-termalnych	90
Ryc. 54. Fragment mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru pilotażowego Jelenia Góra opracowany w ramach projektu MPGN przedstawiający średnie przewodności termiczne skał w W/(m*K) dla głębokości 0–40 m	93

Ryc. 55. Oryginalna mapa efektywnej przewodności termicznej skał podłoża (na głębokości 0–40 m) dla obszaru pilotażowego Warszawa (po lewej) i ta sama mapa właściwości termicznych po przeklasyfikowaniu wg czterech kategorii opisowych (po prawej)	94
Ryc. 56. Widok mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru transgranicznego Wałbrzych/Broumov – średnia efektywna przewodność cieplna dla przedziału głębokości 0–100 m na geoportalu projektu INTERREG GeoPLASMA-CE	96
Ryc. 57. Widok mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru pilotażowego aglomeracji warszawskiej – średnia efektywna przewodność termiczna dla przedziału głębokości 0–100 m na geoportalu PIG-PIB (https://geologia.pgi.gov.pl – kompozycja tematyczna „GEOTERMIA”)	97
Ryc. 58. Schemat obrazujący elementy składowe nazw plików mapowych	97
Ryc. 59. Schemat prac nad sporządzeniem mapy możliwości wykonania OWC z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych	105
Ryc. 60. Wynikowa „Mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych” w skali 1:50 000 dla obszaru pilotażowego Jelenia Góra	106

SPIS TABEL

Tabela 1. Źródła informacji geologicznej dla geotermii niskotemperaturowej w Polsce	20
Tabela 2. Zalecane metody wyznaczania przewodności termicznej gruntów i skał w zależności od litologii i rodzaju badania	27
Tabela 3. Wyniki laboratoryjnych pomiarów przewodności termicznej różnych typów gruntów niespoistych (próbki formowane) Łukawska i in. 2020	35
Tabela 4. Wyniki laboratoryjnych pomiarów przewodności termicznej różnych typów gruntów spoistych (próbki formowane), Łukawska i in. 2020	36
Tabela 5. Zalecane metody oznaczania wartości przewodności termicznej gruntów i skał na próbkach zwietrzałych i spękanych	39
Tabela 6. Wytyczne określania stopnia zwietrzenia masywu skalnego wg PN-EN ISO 14689:2018-05	40
Tabela 7. Przykładowa tabela referencyjna ze zdefiniowanymi przedziałami oporności, przyporządkowanymi do nich wydzieleniami oraz klasami przewodności cieplnej	57
Tabela 8. Zestawienie kodów stratygraficznych zgodnych z CBDG i BDGI	69
Tabela 9. Typy danych wejściowych i ich transformacja do formatu modelowania 3D w oprogramowaniu GoCAD	81
Tabela 10. Przykład standardowej reklasyfikacji przedziałów wartości przewodności termicznej (<i>average thermal conductivity</i>) na paletę kolorów RGB przedstawionych na wynikowych mapach potencjału geotermii niskotemperaturowej (źródło: materiały projektu GeoPlasma-CE)	92
Tabela 11. Nazwy i kody kompozycji mapowych	97
Tabela 12. Podział czynników i warunków uwzględnionych w analizach GIS wykonywanych na potrzeby opracowania map możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła	99
Tabela 13. Klasyfikacja warunków do wykonania analizy przestrzennej możliwości wykonania OWC	102
Tabela 14. Struktura tabeli atrybutów warstw wektorowych	104
Tabela 15. Proponowane nazewnictwo warstw źródłowych w projekcie MPGN	104

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

- Załącznik 1. Wzorzec struktury tabeli wartości przewodności cieplnej w stanie suchym i wilgotnym podstawowych typów petrograficznych gruntów i skał występujących na obszarach pilotażowych map potencjału geotermii niskotemperaturowej
- Załącznik 2. Przykładowe zestawienie danych lokalizacyjnych i nowych pomiarów laboratoryjnych przewodności cieplnej gruntów i skał
- Załącznik 3. Przykładowe zestawienie danych lokalizacyjnych i wyników testu reakcji termicznej
- Załącznik 4. Przykładowa legenda zbiorcza z korelacją wydzieleni skalnych i jednostek geologicznych występujących na mapach geologicznych różnej skali dla mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej obszaru pilotażowego Jelenia Góra
- Załącznik 5. Przykład uproszczonego profilu wzorcowego (syntetycznego) dla mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej obszaru pilotażowego Jelenia Góra
- Załącznik 6. Fragment bazy danych otworowych dla mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej obszaru pilotażowego Jelenia Góra
- Załącznik 7. Kody składników litologicznych (LITKOD) dla warstw skalnych i gruntów zgodne ze słownikiem CBDG
- Załącznik 8. Przykłady modelowania 3D. Model bazowy i model parametryczny
- Załącznik 9. Fragment bazy danych otworowych z przypisanymi seriami SGT oraz parametryzacją termiczną warstw skalnych dla mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej obszaru pilotażowego Jelenia Góra.
- Załącznik 10. Wynikowe mapy potencjału płytkiej geotermii i uwarunkowań środowiskowych dla obszaru pilotażowego Jelenia Góra i aglomeracji warszawskiej
- Załącznik 10.1. Mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych (1:50 000)
- Załącznik 10.2. Mapa przewodności termicznej na głębokości 40 m p.p.t. (1:50 000)
- Załącznik 10.3. Mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych (1:10 000)
- Załącznik 10.4. Mapa przewodności termicznej na głębokości 40 m p.p.t. (1:10 000)
- Załącznik 11. Struktura tabel atrybutów dla warstw przestrzennych GIS potencjału geotermii niskotemperaturowej i uwarunkowań środowiskowych do publikacji na geoportalach PIG-PIB
- Załącznik 12. Słowniki zastosowane w strukturze tabel atrybutów dla warstw przestrzennych GIS potencjału geotermii niskotemperaturowej i uwarunkowań środowiskowych przeznaczone do publikacji na geoportalach PIG-PIB

UŻYTE SKRÓTY

- 3D – odwzorowanie / model trójwymiarowy
 2D – odwzorowanie / mapa dwuwymiarowa
 B(a)P – benzo(a)piren
 BDGI – Baza Danych Geologiczno-Inżynierskich
 CBDG – Centralna Baza Danych Geologicznych
 CBDH – Centralna Baza Danych Hydrogeologicznych (syn. Bank HYDRO)
 c.o. – centralne ogrzewanie
 c.w.u. – ciepła woda użytkowa
 CO₂ – dwutlenek węgla
 COP – ang. Coefficient of Performance
 DEM – ang. Digital Elevation Model
 EED – ang. Earth Energy Designer
 EFRR – Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego
 EGEC – ang. European Geothermal Energy Council
 EHPA – ang. European Heat Pump Association
 GIS – system informacji geograficznej
 GJ – gigadżul
 GPC – geotermalna (gruntowa) pompa ciepła
 GZWP – główny zbiornik wód podziemnych
 h – godzina
 IPCC – ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change*
 ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju (<https://isok.gov.pl>)
 JCWPD – Jednolite części wód podziemnych
 KE – Komisja Europejska
 KPOP – Krajowy Program Ochrony Powietrza
 kW – kilowat
 KWt, kWth, – kilowat/kilowatogodzina energii cieplnej
 λ [W/m*K] – przewodność termiczna (w literaturze przedmiotu stosowany jest również zamiennie termin przewodność cieplna λ)
 λ_{eff} [W/m*K] – efektywna przewodność termiczna
 LIDAR – Light Detecting and Ranging – metoda laserowa sporządzania numerycznych modeli terenu
 ME – Ministerstwo Energii
 MGGP – Mapa geologiczno-gospodarcza Polski
 MGP – Mapa Geologiczna Polski
 MGŚP – Mapa Geośrodowiskowa Polski
 MPGN – Mapa Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej
 MPZP – Miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego
 MW – megawat
 MWth – megawatogodzina (energii cieplnej)
 NAG – Narodowe Archiwum Geologiczne
 NFOŚiGW – Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
 NMT – numeryczny model terenu
 OWC – Otworowy wymiennik ciepła
 OZE – odnawialne źródło energii
 PGG – Prawo Geologiczne i Górnicze
 PGN – Program Gospodarki Niskoemisyjnej
 PIG-PIB – Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy
 PM10 – mieszanina zawieszonych w powietrzu cząstek o średnicy nie większej niż 10 μ m
 PM2,5 – mieszanina zawieszonych w powietrzu cząstek o średnicy nie większej niż 2,5 μ m
 PONE – Program Ograniczenia Niskiej Emisji
 POP – Program Ochrony Powietrza
 PORT PC – Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła
 p.p.t. – poniżej poziomu terenu
 PSG – Państwowa Służba Geologiczna
 PSH – Państwowa Służba Hydrogeologiczna
 PV – system fotowoltaiczny
 rbg/rok – liczba roboczogodzin w roku
 qv [W/m] – współczynnik/wskaźnik jednostkowej wydajności cieplnej OWC
 RES – ang. *renewable energy sources*
 RH&C – ang. *renewable heating and cooling*
 SEAP – ang. *Sustainable Energy Action Plan*
 SEM – ang. *system efficiency monitoring*
 SGT – seria geologiczno-termalna (syn. jednostka geologiczno-geotermiczna)
 SMPG – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski
 SMHP – Szczegółowej Mapy Hydrogeologicznej Polski
 SPF – ang. *Seasonal Performance Factor*
 TCS – ang. *Thermal Conductivity Scanner*
 TRT – ang. *Thermal Response Test*
 TWh – terawatogodzina
 UE – Unia Europejska
 VDI – niem. *Verein Deutscher Ingenieure* (Niemieckie Stowarzyszenie Inżynierów)
 ZF – instalacje pionowe w palach fundamentowych (wariant dolnego źródła ciepła dla gruntowej pompy ciepła)
 ZH – instalacje poziome (wariant dolnego źródła ciepła dla gruntowej pompy ciepła)
 ZK – instalacje spiralne w otworach, wykopach o niewielkiej średnicy (wariant dolnego źródła ciepła dla gruntowej pompy ciepła)

1. WSTĘP

Płytką energią geotermalną, zwana też geotermią niskotemperaturową, jako jedną z form odnawialnych źródeł energii (OZE) jest czysta i bezemisyjna, a jej praktyczne wykorzystanie przy użyciu gruntowych/geotermalnych pomp ciepła (GPC) w zasadzie bezproblemowe (Kapuściński, Rodzoch 2010; Rubik 2011). W związku z niekorzystnymi zmianami klimatycznymi i koniecznością redukcji zanieczyszczenia powietrza, spowodowaną nadmiernym wykorzystywaniem paliw kopalnych, w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój rynku GPC w Polsce i na świecie (Kępińska, 2018, 2019, 2021; Sanner, 2019). Proces ten, pod względem statystycznym, jest monitorowany poprzez coroczne raporty Polskiej Organizacji Rozwoju Technologii Pomp Ciepła – PORT PC (Lachman, 2019; Lachman i in., 2020). Instalacje GPC, które wykorzystują zasoby geotermii niskotemperaturowej zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia budynków, poprzez wykonywanie dużej liczby wierceń pod otworowe wymienniki ciepła powodują znaczącą ingerencję w przypowierzchniowe warstwy podłoża skalno-gruntowego. Szacuje się, że w skali kraju zostało zainstalowanych już ponad 67 300 urządzeń GPC (wg szacunkowego stanu na 2020 r., na podstawie Lachman i in., 2020), z czego zdecydowaną większość stanowią GPC systemów zamkniętych (typu solanka–woda), pobierających energię cieplną z ośrodka gruntowo-skalnego, a jedynie kilkadziesiąt to systemy otwarte (typu woda–woda) korzystające z ciepła płytkich wód podziemnych przy zastosowaniu tzw. dubletów otworowych (studnia produkcyjna, studnia chłonna).

Montaż i eksploatacja GPC, jak każda interwencja człowieka na powierzchni Ziemi, może – w nielicznych przypadkach – mieć także niepożądane skutki, powodujące zagrożenia lub szkody w mieniu i zdrowiu ludzi. Źle wykonana instalacja GPC może np. spowodować zanieczyszczenia podłoża skalnego lub połączenie użytkowych poziomów wód podziemnych np. przez wyciek płynów roboczych z nieszczel-

nych instalacji otworowych wymienników ciepła lub nieodpowiednie wypełnienie przestrzeni pierścieniowej wymienników. Z kolei zbyt bliskie rozmieszczenie wymienników względem siebie może stać się przyczyną przyszłych problemów związanych z niekorzystną interakcją sąsiadujących ze sobą systemów geotermalnych. Zagadnienia te zostały dokładnie omówione w rozdziale 13.

Przyjazne dla środowiska i efektywne pod względem technologicznym wykorzystanie zasobów geotermii niskotemperaturowej, oprócz prawidłowej oceny efektywności energetycznej przyszłej inwestycji (PORT PC 2014) wymaga profesjonalnego wykonania otworów wiertniczych i instalacji urządzenia GPC (Rubik, 2011; PORT PC 2013; PORT PC 2021). Istotna jest także właściwa ocena warunków geologicznych, hydrogeologicznych i termicznych podłoża skalnego (Kozdrój, Kłonowski, 2014). Aktualnie wykonywane projekty i dokumentacje na potrzeby wykorzystania ciepła Ziemi w instalacjach GPC (Ryżyński, Majer, 2015), wymagane ustawą Prawo geologiczne i górnicze (PGG), dostarczają jedynie ogólnych opisów warunków geologiczno-termicznych i tylko w punktowych lokalizacjach. Kluczowe jest zatem opracowanie specjalistycznych narzędzi planistycznych służących ilościowej i jakościowej ocenie tych warunków w skali ogólnokrajowej, takich jak regionalne mapy potencjału płytkiej energii geotermalnej, zwane dalej Mapami Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej (MPGN). Mapy te ukazują zróżnicowanie obszarów (arkuszy) pod względem zasobów energii termicznej w podłożu skalnym. Uzupełnieniem są mapy przedstawiające miejsca występowania potencjalnych konfliktów geośrodowiskowych, gdzie wykonywanie otworów wiertniczych dla wymienników ciepła (OWC), a więc i montaż gruntowych pomp ciepła, jest możliwy bez przeciwwskazań, warunkowo, bądź istnieją ewidentne przeciwwskazania do ich instalacji. Mapy tego typu są więc pomocne przy efektywnym projektowaniu indywidualnych instalacji GPC, jak i do określenia, np. przez wła-

dze lokalne, w jakim stopniu geotermia niskotemperaturowa może zaspokoić zapotrzebowanie na energię ciepłą danego regionu lub aglomeracji miejskiej. W tym znaczeniu mogą być pomocne w tworzeniu i/lub modyfikacji oficjalnych dokumentów rządowych i samorządowych w zakresie wspomagania transformacji energetycznej i wzrostu wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Należy zwrócić uwagę, że dla terenów miejskich kluczowe jest odniesienie się do szczegółowych zapisów Miejscowych Planów Zagospodarowania Przestrzennego (MPZP), w tym do map zagospodarowania terenu (w kontekście m.in. stopnia i rodzaju zabudowy, infrastruktury naziemnej i podziemnej itp.). Należy pamiętać, że istnieją miejscowości (zwłaszcza uzdrowiskowe), w których zapisy MPZP ograniczają lub nawet wykluczają możliwości wykorzystania ciepła Ziemi. Dotyczy to w szczególności:

– części obszarów miejskich, w obrębie których zlokalizowano główny zbiornik wód podziemnych (GZWP);

– strefy ochrony ujęć wód pitnych oraz innych (np. wód leczniczych zaliczonych do kopalin). Szczegółowy sposób wykonywania tego rodzaju map uwarunkowań środowiskowych opisano w rozdziale 13.

Niniejsza Instrukcja powstała w ramach zadania państwowej służby geologicznej pt. „Ocena potencjału energetycznego i uwarunkowań środowiskowych dla wsparcia zrównoważonego rozwoju geotermii niskotemperaturowej” (zwanego dalej projektem MPGN) wykonanego przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) w latach 2017–2021. Obszary pilotażowe, na bazie których powstała niniejsza Instrukcja, zostały podzielone na dwie grupy:

a. warstwy informacyjne wykonywane w cięciu arkuszowym SMGP w skali 1:50 000 dla 9 arkuszy:

- arkusz SMGP 795 – Jelenia Góra;
- arkusz SMGP 1012 – Bielsko Biała;
- arkusz SMGP 1013 – Lachowice;
- arkusz SMGP 1014 – Sucha Beskidzka;
- arkusz SMGP 1051 – Piwniczna;
- arkusz SMGP 1052 – Muszyna;

- arkusz SMGP 1053 – Tylisz;
 - arkusz SMGP 1032 – Rabka;
 - arkusz SMGP 1033 – Mszana Górna;
- b. warstwy informacyjne wykonywane w skali 1:10 000 dla 2 obszarów miejskich:
- rejon aglomeracji Warszawa (89 arkuszy w skali 1:10 000);
 - rejon aglomeracji Wrocław (48 arkuszy w skali 1:10 000).

Instrukcja ta w dużym stopniu oparta jest na doświadczeniach i rezultatach kilku wcześniejszych projektów badawczo-rozwojowych dotyczących płytkiej geotermii finansowanych ze środków Unii Europejskiej – z partnerskim udziałem PIG-PIB – o akronimach TransGeoTherm (2012–2015; <http://www.transgeotherm.eu>) i GeoPLASMA-CE (2016–2019; <https://portal.geoplasma-ce.eu>) oraz funduszy norweskich – Geothermal 4PL (2016–2017; <https://www.pgi.gov.pl/en/geothermal4pl-2.html>). Wykorzystano również doświadczenie z projektu MUSE (Managing Urban Shallow Geothermal Energy) realizowanego przez europejskie służby geologiczne EuroGeoSurveys w ramach projektu Horizon 2020 GeoERA (<https://geoera.eu/projects/muse>). Należy zaznaczyć, że projekt GeoPLASMA CE, w ramach regionalnej syntezy lokalnych metod sporządzania map potencjału geotermii niskotemperaturowej, w dużej mierze uwzględnił doświadczenia niemieckich służb geologicznych, które mają specyfikę regionalną (związaną z poszczególnymi krajami związkowymi – landami).

Niniejszą Instrukcję należy uznać za możliwą do wykorzystania na całym obszarze Polski. Uwzględniając jej przetestowanie na obszarach pilotażowych zrealizowanych w ramach Projektu MPGN oraz GeoPLASMA CE i Trans GeoTherm (w sumie 8 obszarów pilotażowych) informacje zawarte w niniejszym dokumencie umożliwiają wykonanie kolejnych map potencjału geotermii niskotemperaturowej i map możliwości wykonania OWC z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych na dowolnym obszarze kraju.

Założono, że odbiorcą Instrukcji są specjaliści z zakresu nauk o Ziemi, którzy będą podejmować się zadania wykonywania nowych map potencjału geotermii niskotemperaturowej i uwa-

runkowań środowiskowych geotermii niskotemperaturowej. Dlatego też niniejsza Instrukcja z założenia skupia się na zagadnieniach związanych z wykonywaniem przedmiotowych map i zakłada posiadanie przez odbiorcę podstawowej wiedzy z zakresu geologicznego modelowania 3D, systemów informacji przestrzennej – GIS oraz ogólnej znajomości tematyki geotermii niskotemperaturowej i technologii gruntowych pomp ciepła.

Instrukcja nie jest skierowana wprost do Inwestorów, Projektantów i Wykonawców systemów gruntowych pomp ciepła i w związku z tym nie zawiera szczegółowych wyjaśnień podstawowych koncepcji geologiczno-technicznych będących w zakresie szeroko rozumianej wiedzy geologicznej.

Niniejszy dokument posłużył do opracowania arkuszy pilotażowych projektu MPGN i pozyskania doświadczeń niezbędnych do rozpoczęcia seryjnej produkcji regionalnych map potencjału geotermii niskotemperaturowej i uwarunkowań środowiskowych. Ponadto, w miarę realizacji kolejnych etapów i arkuszy MPGN jako ciągłego zadania państwowej służby geologicznej, Instrukcja będzie sukcesywnie aktualizowana wraz z udoskonalaniem i optymalizowaniem metodyki sporządzania map.

Powstałe na podstawie Instrukcji mapy tematyczne usprawniają optymalizację (wymiarowanie) energetycznej efektywności GPC poprzez dostarczenie wiarygodnych danych o właściwościach termicznych podłoża skalnego, a także umożliwiają sprawdzenie, czy na danym terenie nie ma formalnych i środowiskowych przeszkód dla ich montażu.

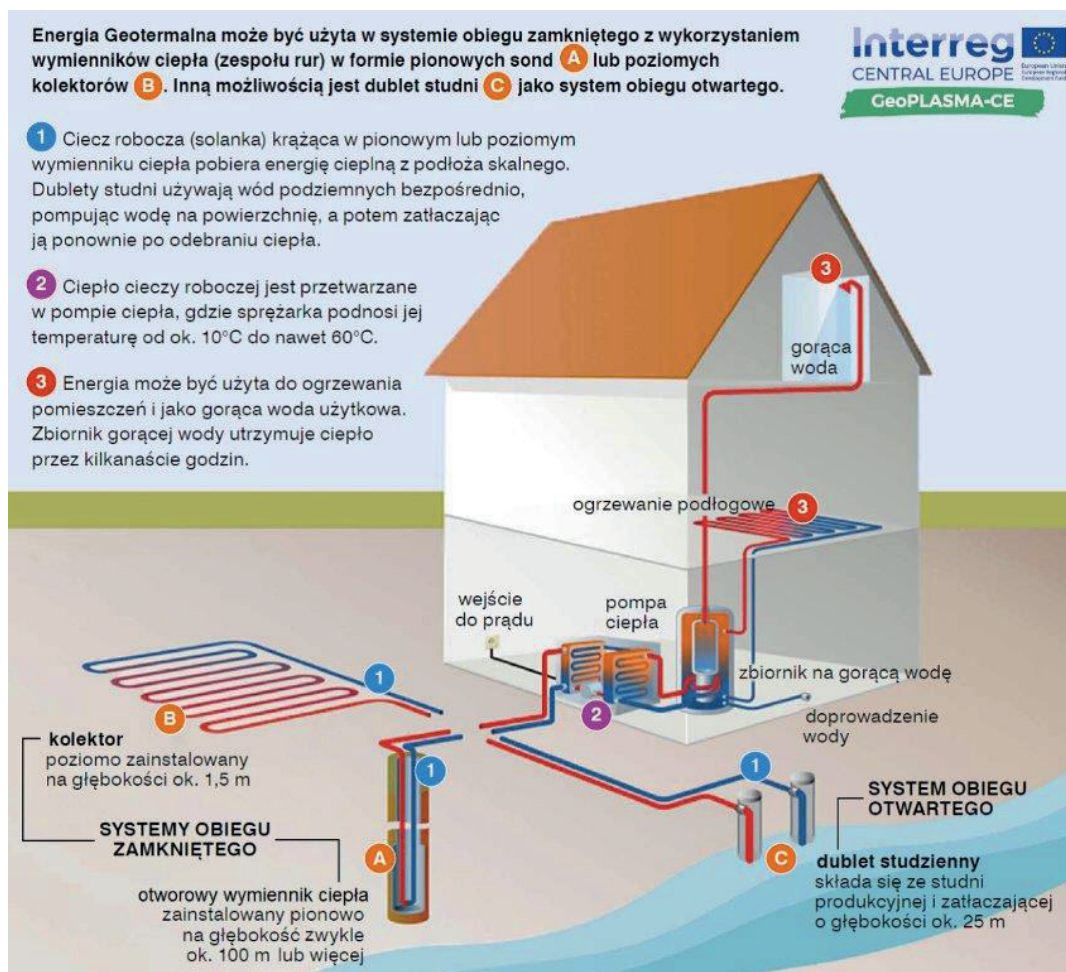
Powstałe mapy tematyczne stanowią istotną pomoc dla:

- podmiotów gospodarczych i inwestorów indywidualnych wstępnie szacujących efektywność GPC;
- organów administracji geologicznej w podejmowaniu decyzji urzędowych dotyczących projektów robót geologicznych sporządzonych w celu wykorzystania ciepła Ziemi;
- władz samorządowych w tworzeniu lokalnych strategii rozwoju OZE bądź planów ograniczania niskiej emisji.

Niniejsza Instrukcja dotyczy wyłącznie opracowywania map potencjału geotermii niskotemperaturowej i uwarunkowań środowiskowych tylko dla GPC systemów zamkniętych z uwagi na zdecydowaną dominację w Polsce zastosowań GPC typu solanka–woda z otworowym wymiennikiem ciepła. Systemy otwarte, wykorzystujące warstwy wodonośne jako dolne źródło ciepła, nie są objęte opracowaniem.

Otworowe wymienniki ciepła składają się zwykle z zestawu dwóch lub czterech rur polietylenowych w kształcie litery U (zwanych dalej U-rurką) umieszczonych wewnątrz otworu wiertniczego. Przestrzeń między rurami a ścianami otworu jest wypełniana mieszkanką cementową w celu odpowiedniego połączenia całości systemu i polepszenia przepływu ciepła pobieranego ze skał otaczających. Rury wymiennika są szczelnie zamykane i wypełniane płynem roboczym, tzw. solanką będącą mieszaniną wody i środka przeciw zamarzaniu (np. glikolu). Ciepło z gruntu jest pochłaniane przez płyn roboczy, który cyrkuluje w wymienniku otworowym. Po sprężeniu mechanicznym, zachodzącym w wymienniku głównej jednostki pompy ciepła, płyn oddaje ciepło do drugiego (górnego) obiegu grzewczego, który rozprowadza je wewnątrz budynku (ryc. 1). Z uwagi na niską temperaturę płynu roboczego, którą osiąga on po oddaniu ciepła w sprężarce, do jego ponownego podgrzania o kilka stopni wystarczająca jest energia cieplna skał o naturalnej temperaturze ok. 5–10°C. Dlatego też ważnym czynnikiem dobrego działania GPC jest szybkość termicznej regeneracji skał, która zależy od wartości ich przewodności termicznej.

Opracowanie map potencjału geotermii niskotemperaturowej dla systemów zamkniętych bazuje przede wszystkim na danych określających przewodność termiczną gruntów i skał. Drugim równorzędnym czynnikiem jest występowanie w ośrodku gruntowo-skalnym wód podziemnych, co pozwala na wyróżnienie w profilach otworów, gruntów i skał w strefie aeracji („suchych”) i saturacji („nawodnionych”). Mapy potencjału geotermalnego mogą przedstawiać rozkład przestrzenny specyficz-



Ryc. 1. Schemat działania gruntowych pomp ciepła systemu zamkniętego (z pionowym i poziomym wymiennikiem ciepła) i systemu otwartego w domu jednorodzinnym (źródło: materiały projektu GeoPLASMA-CE)

nych parametrów termicznych skał, takich jak: (i) średnia ważona efektywna przewodność termiczna – λ_{eff} [W/m*K] lub (ii) współczynnik/wskaźnik jednostkowej wydajności termicznej OWC, opisujący wielkość ekstrakcji ciepła ze skał podłoża – q_v [W/m].

Do obliczeń jednostkowej wydajności cieplnej dla systemu pracującego tylko w trybie ogrzewania dla 1800 h w skali roku zastosowano wzór (wg Sannera, 1999; PORT PC 2013, zmodyfikowano PIG-PIG):

$$q_v 1800 = \lambda \cdot 9,91 + 25,51$$

gdzie:

$q_v 1800$ – jednostkowa wydajność cieplna obliczana dla 1800 h pracy pompy [W/m];

λ – średnia ważona przewodność termiczna profilu [W/m*K].

Do obliczeń jednostkowej wydajności cieplnej dla systemu pracującego tylko w trybie ogrzewania dla 2100 h w skali roku zastosowano wzór (wg Sannera, 1999; PORT PC 2013, zmodyfikowano PIG-PIG):

$$q_{v2100} = \lambda \cdot 10,21 + 19,64$$

gdzie:

q_{v2100} – jednostkowa wydajność cieplna obliczana dla 2100 h pracy pompy [W/m];

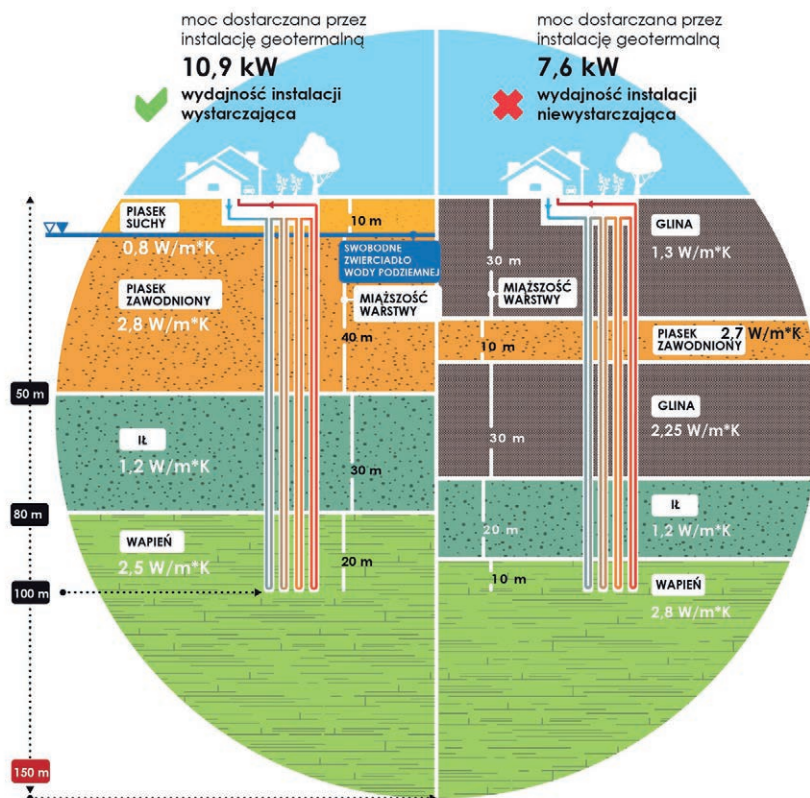
λ – średnia ważona przewodność termiczna profilu [W/m*K].

Średnia (efektywna) przewodność cieplna jest parametrem związanym jedynie z litologią masywu skalno-gruntowego otaczającego wymiennik. Jest to parametr użyteczny głównie dla projektantów systemów geotermii niskotemperaturowej wykorzystujących gruntowe pompy ciepła. Drugi z parametrów – współczynnik/wskaźnik jednostkowej wydajności cieplnej OWC q_v , wyrażony w [W/m], skierowany jest głównie do użytkowników nie będących specjalistami z zakresu nauk o ziemi lub projektowania systemów grzewczo-chłodniczych budynków z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. W przypadku sporządzania map potencjału geotermii niskotemperaturowej w ramach niniejszej Instrukcji bazowano na wzorach przeliczeniowych zgodnych z wytycznymi PORT PC – część 1. Dolne źródła ciepła w edycji pierwszej z 2013 i drugiej z 2021 (Port PC 2013, 2021). Mapy zmienności średniej wartości przewodności cieplnej oraz mapy temperatur powierzchni gruntu stanowią podstawę profesjonalnego planowania i/lub optymalizacji instalacji geotermalnych pomp ciepła i jako takie są głównym przedmiotem niniejszego opracowania. Dodatkowo, znając wartości przewodności cieplnej skał i lokalnego gradientu geotermicznego, można opracować mapy rozkładu temperatur podłoża skalnego na określonej głębokości. Mapy te nie zostały jednak uwzględnione w niniejszej wersji Instrukcji. Planowane jest ich uwzględnienie w aktualizacji dokumentu.

Jak wspomniano wcześniej, mapy obrazujące zróżnicowanie współczynnika/wskaźnika jednostkowej wydajności termicznej OWC (ang. *heat extraction rate*), przeznaczone są dla nieprofesjonalnego użytkownika planującego instalację GPC. Pozwalają bowiem na łatwe powiązanie go z mocą chłodniczą GPC pobieraną z gruntu (inaczej mocą dolnego źródła ciepła) i długością

otworowych wymienników ciepła. Wskaźnik ten wylicza się bezpośrednio ze znanej wartości przewodności termicznej skał przy zastosowaniu specjalnej formuły empirycznej ustalonej przez badaczy niemieckich, na podstawie kilkuletnich obserwacji działania GPC o ściśle określonej mocy, parametrach technicznych i zdefiniowanym rocznym czasie pracy urządzenia służącego do ogrzewania standardowego domu jednorodzinnego. Formułę przyjęto wg wytycznych PORT PC – część 1 Dolne źródła ciepła. (PORT PC, 2013). Aktualnie, zgodnie z rekomendacjami międzynarodowymi projektu GeoPLASMA-CE, nie zaleca się stosowania wyliczonego w ten sposób wskaźnika do optymalizacji GPC z uwagi na zbyt wiele czynników i niedokładności w jego matematycznej konstrukcji oraz w założonych stałych stanowiących element tejże formuły. Wynika to z faktu, że wzór ten oparto na dość wąskim zakresie warunków brzegowych (obliczono go tylko dla jednej założonej temperatury gruntu wynoszącej 8,75°C, dwóch otworowych wymienników ciepła w formie podwójnej U-rurki, jednej wielkości mocy zasilanego obiektu budowlanego przez GPC wynoszącej 11,5 kW i stałego współczynnika efektywności sezonowej SCOP = 3,5). Niemniej jednak na potrzeby niniejszej Instrukcji przyjęto, że w przypadku publikacji, generowane wg formuł zalecanych przez PORT PC mapy wskaźnika jednostkowej wydajności termicznej należy opatrzyć odpowiednimi klauzulami informacyjnymi i metadanymi umożliwiającymi odbiorcom zapoznanie się z ograniczeniami w stosowaniu tych warstw oraz przyjętymi założeniami obliczeniowymi (przykładowe mapy z klauzulami informacyjnymi zawiera załącznik 10).

Ogólna idea wyliczania map potencjału geotermii niskotemperaturowej została przedstawiona na rycinie 2. Dysponując danymi zawierającymi informacje na temat litologii, stratygrafii, własności termicznych skał oraz lokalnych warunków hydrogeologicznych i środowiskowych, możliwe jest określenie potencjału geotermii niskotemperaturowej w analizowanej lokalizacji, który pozwala na wstępną optymalizację projektowania dolnego źródła ciepła dla systemów GPC.



Ryc. 2. Schemat przedstawiający wpływ warunków geologicznych na moc energetyczną gruntowej pompy ciepła z wymiennikiem otworowym

Założenia do schematu: budynek jednorodzinny; powierzchnia użytkowa – 200 m²; zapotrzebowanie na moc grzewczą – 10 kW; instalacja geotermalna – 2 sondy pionowe w otworach wiertniczych o głębokości 100 m; liczba godzin pracy instalacji: 1800 h/rok

2. MAPY POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ W SKALI 1:50 000 I 1:10 000 – GŁÓWNE ZBIORY DANYCH I ZARYS METODYKI OPRACOWANIA

Sporządzenie map potencjału geotermii niskotemperaturowej dla regionów w skali 1:50 000 opiera się zasadniczo na wykorzystaniu i transformacji zasobów informacji seryjnych arkuszy Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000 (SMGP), Mapy Hydrogeologicznej Polski 1:50 000 (MHP) oraz otworowych baz danych (zarządzanych przez PIG-PIB), uzupełnionych o dane dotyczące właściwości termicznych skał. Ważnym elementem procesu wyko-

nywania map regionalnych jest opracowanie trójwymiarowego modelu budowy geologicznej – określanego jako **model bazowy**, który następnie jest przekształcany w **model parametryczny** służący do wyliczenia średniej wartości przewodności termicznej skał w każdym punkcie badanego obszaru i do wybranego poziomu głębokości. Zgodnie z rekomendacjami projektu GeoPLASMA-CE rozdzielczość rozkładu węzłów siatek trójkątów (TIN) i rastrowych siatek

obliczeniowych (GRID) wykonywanych modeli (bazowego i parametrycznego) dla obu cięć arkuszowych (1:10 000 i 1:50 000) to 25×25 m.

Mając na uwadze fakt, że rozdzielczość modelowania jest taka sama (25×25 m) w przypadku opracowywania map w obu skalach – 1:50 000 i 1:10 000, uznano, że metodyka sporządzania map potencjału geotermii niskotemperaturowej dla aglomeracji miejskich w skali 1:10 000 jest praktycznie identyczna z tą dla map w skali 1:50 000, opisaną szczegółowo w rozdziale 3. W przypadku aglomeracji miejskich należy uwzględnić dodatkowy zasób danych otworowych, tj. Bazę Danych Geologiczno Inżynierskich (BDGI). Natomiast w celu sporządzania map uwarunkowań środowiskowych dla obszarów miejskich w skali 1:10 000 należy zwrócić szczególną uwagę na istniejące zapisy MPZP, które ograniczają lub nawet wykluczają możliwości lokalnego wykorzystania ciepła Ziemi.

Regionalne mapy potencjału w skali 1:50 000 powstają podczas złożonego, wieloetapowego procesu przetwarzania danych, obejmujących m.in. utworzenie dedykowanej bazy danych otworowych, opracowanie trójwymiarowego, geologicznego modelu bazowego (do głębokości ok. 200÷500 m) z wyróżnieniem serii geologiczno-termalnych (SGT) oraz cyfryzację i parametryzację użytych do konstrukcji tego modelu profili otworów wiertniczych. Ta ostatnia procedura służy stworzeniu modelu parametrycznego i polega na przypisaniu poszczególnym warstwom litologicznym w otworze specyficznej wartości współczynnika przewodności termicznej wyrażonej w jednostkach $[W/m \cdot K]$ osobno dla skał w strefie aeracji (zalegających powyżej pierwszego poziomu wód podziemnych) i saturacji (zalegających poniżej zwierciadła wód). Wartości λ w stanie suchym i wilgotnym definiuje się uprzednio dla wszystkich, typowych odmian petrograficznych skał opisanych w wierceniach na danym terenie, bazując na danych archiwalnych lub nowych pomiarach laboratoryjnych skał pobranych z odsłonień lub rdzeni wiertniczych. Dalsze kalkulacje numeryczne polegają na wyliczeniu średniej wartości (ważonej) λ we wszystkich otworach wiertni-

czych (osobno dla każdej wyróżnionej w otworze serii geologiczno-termalnej), a następnie – z wykorzystaniem bazowego modelu 3D – w każdym punkcie tzw. siatki bazowej (ang. *Mastergrid*, odpowiadającej rozdzielczości modelowania 3D czyli 25×25 m) badanego obszaru. Tak obliczone średnie wartości przewodności termicznej skał podłoża, przedstawia się za pomocą gamy kolorów odpowiadających kolejnym wzrostom λ na mapach potencjału geotermii niskotemperaturowej sporządzanych osobno dla predefiniowanych przedziałów głębokości, np. 0÷40 m, 0÷70 m, 0÷100 m, 0÷130 m. Mapy te są ostatecznie zapisywane w geobazie GIS i publikowane w formie usług WMS, WFS lub REST, dzięki czemu mogą być udostępnione odbiorcom za pomocą geoportali GIS dostępnych online, takich jak np. <https://geologia.pgi.gov.pl> oraz <https://geolog.pgi.gov.pl>.

W celu prawidłowej oceny potencjału energetycznego geotermii niskotemperaturowej, w rejonach o skomplikowanej tektonice i zróżnicowanej morfologii (np. w obszarach górskich Sudetów i Karpat), uzupełnieniem map potencjału geotermii niskotemperaturowej mogą być opracowane dodatkowe mapy średniorocznych rozkładów temperatur na powierzchni Ziemi oraz dla temperatur do głębokości 100 i 200 m p.p.t. Dane tego typu są przydatne w procesie projektowania i optymalizacji mocy GPC oraz symulacji ich wieloletniej pracy. Mapy temperatur na powierzchni gruntu wykonuje się z użyciem danych satelitarnych, a mapy temperatur w podłożu skalnym wg danych geofizyki otworowej z odczytami temperatur bądź pomiarów gęstości strumienia/stopnia cieplnego (w zależności od dostępności tych informacji). Tego typu mapy nie są przedmiotem niniejszej Instrukcji. Metodykę ich opracowywania wstępnie opisano w materiałach projektu GeoPLASMA-CE.

Wykorzystywanie map potencjału geotermii niskotemperaturowej nie zwalnia z formalno-prawnego obowiązku sporządzenia projektu robót geologicznych wykonywanych w celu pozyskiwania ciepła Ziemi (PRG) oraz powyższej dokumentacji geologicznej.

Pełen obraz czynników wpływających na wydajność energetyczną otworowych wymienników ciepła (OWC) powinien zostać opracowany przez uprawnionego geologa projektującego i dokumentującego dolne źródło systemu gruntowych pomp ciepła. W PRG należy m.in. określić przewidywane profile OWC oraz opisać i uzasadnić ich liczbę oraz uzyskaną moc instalacji w kW. Należy również opracować projekt geologiczno-techniczny OWC, czyli przewidywaną konstrukcję otworów wiertniczych. Poprawnie wykonany PRG pozwala na zapewnienie odpowiedniego zapasu mocy cieplnej i chłodniczej wykonanych instalacji OWC.

Należy zaznaczyć, że mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej powstają na podstawie numerycznego modelowania 3D oraz analiz przestrzennych GIS. Wyniki tych prac przedstawione w postaci map i warstw informacyjnych są rezultatem obliczeń geostatystycznych i z założenia stanowią wyłącznie przybliżony obraz warunków rzeczywistych i, co za tym idzie, nie zastępują one szczegółowej, lokalnej analizy prowadzonej dla rozpatrywanej inwestycji (lokalizacji) na etapie projektowania robót geologicznych i sporządzania PRG.

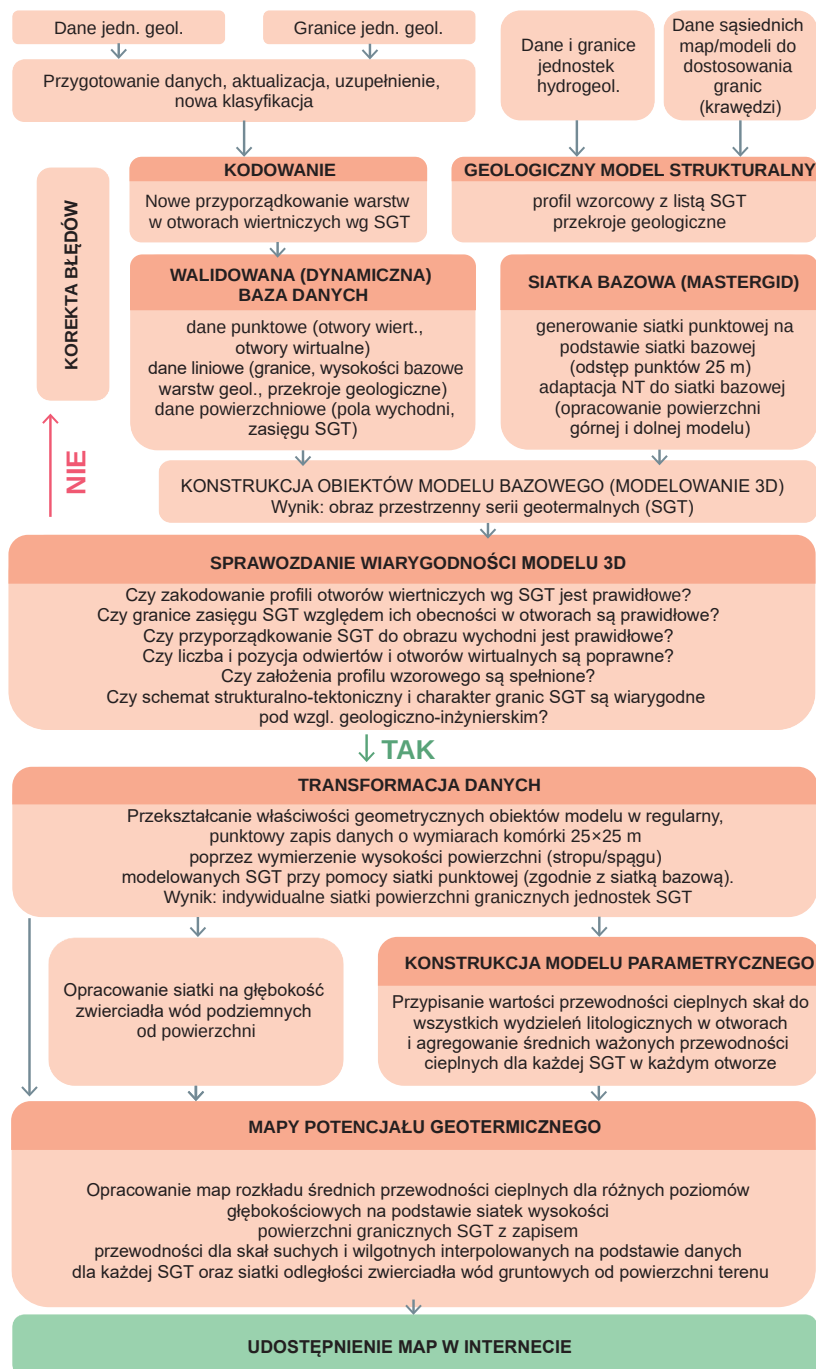
3. OKREŚLENIE METODYKI SPORZĄDZANIA REGIONALNYCH MAP POTENCJAŁU PŁYTKIEJ GEOTERMII W SKALI 1:50 000 – ETAPY REALIZACJI

Gromadzenie i przetwarzanie danych wejściowych na potrzeby opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej odbywa się w środowisku GIS (np. ArcGIS lub QGIS) oraz przy użyciu specjalistycznego oprogramowania służącego do wykonywania modeli trójwymiarowych (np. GoCAD, Petrel lub GeoScene3D), a także innych pomocniczych aplikacji (np. GeoSTAR). Główne czynności tworzenia map regionalnych są realizowane w następujących etapach: (omówionych w dalszych rozdziałach):

1. Inwentaryzacja danych archiwalnych (mapy geologiczne i hydrogeologiczne, otwory wiertnicze, przekroje geologiczne, dane geofizyczne, pomiary przewodności cieplej skał, inne). Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziałach 4.1 i 4.6.1.
2. Przygotowanie danych wejściowych i ich przetwarzanie w środowisku GIS (dane punktowe, liniowe oraz powierzchniowe, numeryczny model terenu –NMT, ang. DEM – *digital elevation model*, siatka bazowa tzw. *Mastergrid* 25 × 25 m). Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 5.
3. Opracowanie podstawowego modelu strukturalnego (na podstawie profilu syntetycznego) jako lito-stratygraficznego profilu wzorcowego

z listą serii geologiczno-termalnych (SGT), wraz z profilami otworów archiwalnych oraz wirtualnych i przekrojami geologicznymi archiwalnymi oraz autorskimi, zaseriowanymi zgodnie z SGT. Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 5.11.

4. Opracowanie geologicznego **modelu bazowego** 3D na podstawie wyróżnionych serii geologiczno-termalnych (SGT). Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 7.
5. Eksport siatek powierzchni granicznych serii geologiczno-termalnych jako gridy lub punkty oraz konwersja do formatu rastrowego zgodnego z siatką bazową. Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 8.
6. Opracowanie siatki odległości zwierciadła wód podziemnych od powierzchni terenu. Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 9.
7. Opracowanie modelu parametrycznego z przypisaniem wartości przewodności termicznych dla gruntów i skał w strefach aeracji oraz saturacji do zakodowanych wydzieleń litologiczno-petrograficznych w profilach otworów wiertniczych. Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 10.
8. Opracowanie map rozkładu średniej przewodności termicznej skał dla wyznaczonego ob-



Ryc. 3. Schemat etapów prac w celu wykonania modelu bazowego (3D), modelu parametrycznego oraz sporządzenia map potencjału geotermicznego

jedn. geol. – jednostka geologiczna; SGT – seria geotermalna; NMT – numeryczny model terenu; wykorzystano materiały projektów TransGeoTherm oraz GeoPLASMA

szażu i w określonych przedziałach głębokości podłoża skalnego. Obliczenia przy wykorzystaniu skryptów Python lub innych narzędzi obliczeniowych (np. IE Geotermie, moduły obliczeniowe oprogramowania Petrel i inne). Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 11.

9. Eksport plików wynikowych i udostępnienie map potencjału geotermii niskotemperaturowej na portalu internetowym. Zadanie to zostało szczegółowo opisane w rozdziale 12.

Cyfrowe przetwarzanie danych wejściowych, służących do stworzenia spójnego, trójwymia-

rowego modelu geologicznego, a następnie do wykonania map potencjału geotermii niskotemperaturowej, jest procesem iteracyjnym, wymagającym staranności i ciągłej kontroli spójności danych (ryc. 3). Poprawność wykonania jednej czynności rzutuje na kolejne działania, stąd konieczność zachowania stałej uwagi i sprawdzania zgodności przeprowadzonych operacji z ustalonymi procedurami. W razie stwierdzenia niezgodności lub otrzymania błędnego wyniku cząstkowego należy dokonać poprawek bądź uzupełnień danych i powtórzyć konkretną czynność, aż do uzyskania prawidłowego rezultatu.

4. ZAWARTOŚĆ BAZY DANYCH NIEZBĘDNA DO OPRACOWANIA MAP POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ

4.1. DANE ARCHIWALNE

Podstawą do wykonania bazowego modelu geologicznego 3D, a także zaprojektowania robót geologicznych dla termopiezometrów jest zebranie i analiza materiałów archiwalnych. Poprawne przeprowadzenie wstępnej inwentaryzacji dostępnych danych jest niezbędne do realizacji wszystkich późniejszych analiz projektowych.

Zebraniu i analizie powinny podlegać w szczególności: bazy danych otworów wiertniczych, wybrane warstwy z bazy arkuszowej SMGP, MHP oraz MGŚP w skali 1:50 000. Zaleca się również wykorzystanie arkuszy Mapy Geologicznej Polski (MGP) w skali 1:200 000, które przedstawiają uproszczony obraz kartograficzny danego regionu i zgrupowane jednostki litostratigraficzne, co może okazać się pomocne podczas analizy i ewentualnego scalania wydzieleni grunto-skalnych na potrzeby modelowania 3D. Ponadto zaleca się wykorzystanie map geologicznych o większej rozdzielczości np. Szczegółowej mapy geologicznej Sudetów w skali 1:25 000 lub Szczegółowej mapy geologicznej Tatr w skali 1:10 000, zwłaszcza na obszarach o złożonej budowie geologicznej i skomplikowanej tektonice (Sudety, Karpaty). Na obszarach miejskich i w rejonach aglomeracji miejskich powinno się do-

datkowo uwzględnić Bazę Danych Geologiczno-Inżynierskich.

W celu sporządzenia map potencjału geotermii niskotemperaturowej, jak również poprawnego projektu robót geologicznych dla termopiezometrów, należy wykorzystywać wszystkie dostępne źródła informacji geologicznej. W tabeli 1 zestawiono pozycje, które powinny być uwzględnione na etapie analizy materiałów archiwalnych. Są to mapy geologiczne i hydrogeologiczne publikowane przez PIG–PIB (SMGP, MHP i MGŚP) oraz bazy danych geologicznych obejmujące: Centralną Bazę Danych Geologicznych (CBDG), Centralną Bazę Danych Hydrogeologicznych (CBDH, zwaną też – Bankiem HYDRO) oraz Bazę Danych Geologiczno-Inżynierskich (BDGI). Istotnym aspektem analizy danych archiwalnych jest przegląd już wykonanych opracowań z dziedziny geotermii niskotemperaturowej, przeważnie w postaci cyfrowych map udostępnianych na portalach internetowych.

Źródła danych wymienione w tabeli poniżej (tab. 1), w pozycjach od 1 do 13, wraz z pozyskanymi otworami archiwalnymi z rejonu projektowanych prac, stanowią podstawę do opracowania opisu budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych, sporządzenia przewidywanych profili geologicznych projektowanych otworów,

Tabela 1. Źródła informacji geologicznej dla geotermii niskotemperaturowej w Polsce

Lp.	Źródło danych	Skala	Adres internetowy	Treść	Instytucja	Przydatność do projektowania dolnych źródeł ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej
1.	SMGP	1:50 000	http://geologia.pgi.gov.pl (zakładka „Mapy geologiczne”) – warstwa mapowa „Mapy arkuszowe PIG-PIB w skali 1:50 000)	Podstawowa mapa geologiczna kraju, główne źródło informacji geologicznej	PIG-PIB	Jeden z podstawowych załączników do Projektu robót geologicznych
2.	MHP	1:50 000	http://geologia.pgi.gov.pl (zakładka „Mapy geologiczne”) – warstwa mapowa „Mapy arkuszowe PIG-PIB w skali 1:50 000)	Kartograficzny obraz warunków występowania, hydrodynamiki, zasobności i jakości głównego użytkowego poziomu wodonośnego	PIG-PIB	Jeden z podstawowych załączników do Projektu robót geologicznych
3.	MGŚP	1:50 000	http://geologia.pgi.gov.pl (zakładka „Mapy geologiczne”) – warstwa mapowa „Mapy arkuszowe PIG-PIB w skali 1:50 000)	Przedstawia stan i zasoby środowiska naturalnego, w tym obszary chronione.	PIG-PIB	Jeden z podstawowych załączników do Projektu robót geologicznych
4.	CBDH	różna	http://spd.pgi.gov.pl/PSHv8/Psh.html	Otwory hydrogeologiczne (dostępne po złożeniu wniosku i uiszczeniu opłaty za udostępnienie informacji geologicznej)	PIG-PIB	Profile otworów z bazy CBDH są podstawą do opracowania przewidywanego profilu geologicznego w projekcie robót geologicznych. Główne źródło informacji do projektowania OWC
5.	CBDG	różna	http://baza-pgi.gov.pl/	Baza otworowa Polski, mapa geologiczna w skali 1:500 000, badania geofizyczne,	PIG-PIB	Profile otworów z bazy CBDG są podstawą do opracowania przewidywanego profilu geologicznego w projekcie robót geologicznych
6.	BDGI	1:10 000	http://atlasy.pgi.gov.pl lub http://geologia.pgi.gov.pl (zakładka „Budownictwo”)	Atlasy geologiczno-inżynierskie dla miast w tym otwory i mapy tematyczne. (możliwość pobierania map i kart otworów z przeglądarek mapowych CBDG)	PIG-PIB	Profile otworów z bazy BDGI są podstawą do opracowania przewidywanego profilu geologicznego w projekcie robót geologicznych. Baza użyteczna do systemów typu ZH, ZK i ZF
7.	Przeglądarka mapowa PSG	różna	http://geologia.pgi.gov.pl (zakładka „Wody podziemne:)	Dane hydrogeologiczne, m.in. Główne zbiorniki wód podziemnych (GZWP), Jednolite części wód podziemnych (JCWPD), otwory z bazy CBDH, Monitoring Wód Podziemnych	PIG-PIB	Podstawowe źródło informacji o głównych zbiornikach wód podziemnych.
8.	System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych MI-DAS	różna	http://geoportal.pgi.gov.pl/midas-web	Złóża, obszary i tereny górnicze	PIG-PIB	Podstawowe źródło informacji o złóżach, obszarach i terenach górniczych

Tab. 1 – cd.

Lp.	Źródło danych	Skala	Adres internetowy	Treść	Instytucja	Przydatność do projektowania dolnych źródeł ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej
9	GEOPLASMA CE	Siatka modelu 3D 25 × 25 m	https://portal.geoplasma-ce.eu/ oraz kanał Youtube projektu: (na kanale dostępne są filmy informacyjne i edukacyjne dotyczące geotermii niskotemperaturowej)	„GeoPLASMA-CE – Shallow Geothermal Energy Planning. Assessment and Mapping Strategies in Central Europe” (Opracowanie zasad planowania, strategii wykorzystania oraz metod oceny i wykonywania map potencjału płytkiej geotermii w Europie Środkowej)	grupa 11 instytucji z Europy środkowej (w tym PIG-PIB i AGH jako reprezentanci Polski)	Pomoce przy projektowaniu systemów GPC: mapy geotermalne współzmiennika mocy cieplnej [W/m] oraz wartości przewodności cieplnej skał podłoża [W/m*K] Materiały edukacyjno-informacyjne (filmy Youtube)
10.	TansGeoTherm	Siatka modelu 3D 25 × 25 m	http://www.transgeotheerm.eu/	Energia geotermalna dla transgranicznego rozwoju regionu Nysy. Projekt pilotażowy PL-DE, w rejonie Zgorzelca i Görlitz. Mapy i model geologiczny 3D. Broszura informacyjna na temat stosowania płytkiej geotermii	PIG-PIB Saksońska służba geologiczna (LfULG)	Pomoce przy projektowaniu systemów GPC: mapy geotermalne współzmiennika mocy cieplnej [W/m] oraz wartości przewodności cieplnej skał podłoża [W/m*K]
11.	Thermo Map	1:250 000 (obszary szczegółowe w skali od 1:5 000 do 1:50 000)	https://www.thermomap.eu/	Poglądowa mapa potencjału niskotemperaturowej energii geotermalnej do głębokości 10 m. Obejmuje obszar całej Europy.	projekt między-narodowy (Francja, Islandia, Węgry, Rumunia, Wielka Brytania, Belgia, Niemcy, Austria, Grecja)	Dane tylko do głębokości 10 m. Przydatne do projektowania systemów ZH i ZK. Zawiera informacje o obszarach z ograniczeniami w wykorzystaniu energii geotermalnej
12.	Geothermal4PL	(nie dotyczy)	https://www.pgi.gov.pl/geothermal4pl	Geothermal4PL Wsparcie zrównoważonego rozwoju i wykorzystania płytkiej energii geotermalnej na terenie obszarów objętych programem Mieszkanie Plus w Polsce”	PIG-PIB (PL), CMR (NO), NTNU (NO), Geological Survey of Norway (NO)	W ramach projektu powstała m.in. baza wiedzy o geotermii niskotemperaturowej, obejmująca m.in. wydanie polskojęzycznych wersji poradników GEO-TRAINET
13.	NAG	(nie dotyczy)	https://www.pgi.gov.pl/narodowe-archiwum-geologiczne.html	NAG to prowadzone przez PIG-PIB główne krajowe archiwum dokumentów geologiczno-środowiskowych i próbek geologicznych, które stanowi podstawę wspomagania działania państwowej służby geologicznej i państwowej służby hydrogeologicznej.	PIG-PIB	Dane z dokumentacji geologicznych w wersji analogowej i cyfrowej (skany pdf) które mogą być wykorzystywane do opracowania syntetycznego profilu geologicznego w miejscu projektowanych otworowych wymienników ciepła

a także do oceny przewidywanych wartości przewodności termicznej gruntów i skał.

Większość danych zestawionych w tabeli (tab. 1) jest ogólnodostępna i możliwa do pobrania bezpośrednio ze stron internetowych i geoportali PIG-PIB, takich jak: <https://geologia.pgi.gov.pl> oraz <https://geolog.pgi.gov.pl> (np. arkusze SMGP lub profile i karty otworów wiertniczych z bazy BDGI) lub na stronach internetowych projektów międzynarodowych. Dostęp do wybranych danych wymaga wypełnienia odpowiednich wniosków i formularzy zgodnie z obowiązującymi wewnętrznymi procedurami dotyczącymi ich udostępniania (np. CBDH – tzw. Bank HYDRO, dostęp do archiwalnej dokumentacji w wersji analogowej lub cyfrowej zgromadzonej w NAG).

Zestawienie przedstawione w tabeli 1 jest podstawą kwerendy danych archiwalnych. Może być ono rozszerzone zgodnie z dostępnością lokalnych danych archiwalnych np. znajdujących się w archiwach firm prywatnych (przedsiębiorstw) lub lokalnych władz samorządowych i innych istotnych urzędów.

Należy uwzględnić również przegląd pozycji literaturowych odnoszących się zarówno do budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i środowiskowych, a także w ramach dostępności do warunków termicznych na danym obszarze.

W związku z opracowywaniem map potencjału geotermii niskotemperaturowej dane profile otworów wiertniczych, pozyskane z różnych otworowych baz danych PIG-PIB (CBDG, CBDH, BDGI) i innych dokumentacji archiwalnych, należy zestawić i ujednolicić w formie zbiorczej tabeli (w formacie Excel lub jako baza programu Access, zgodna z załącznikami 1, 2, 6, 7, i 9). Tabela powinna zawierać kolumny z informacją o każdym odwiercie, w tym: kod ID, oryginalną nazwę otworu, współrzędne geograficzne, rzędną wysokościową otworu, dane o wysokości i miąższości napotkanych w profilu wydzieleni litologicznych (warstwach skalnych), dane petrograficzne i stratygra-

ficzne, informacje o wodach podziemnych. Dane otworowe należy poddać procesom weryfikacji, aktualizacji oraz selekcji pod kątem przydatności do tworzenia modelu 3D budowy geologicznej danego obszaru. Najczęściej spotykane błędy dotyczą lokalizacji otworów wiertniczych (koordynat geograficznych i wysokości nad poziomem morza) bądź wiekowej kwalifikacji stratygraficznej wydzieleni litologicznych. Należy je zweryfikować, np. sięgając do dokumentów źródłowych, czyli dokumentacji geologicznych zgromadzonych w NAG lub w archiwach innych podmiotów takich jak Główny Instytut Górnictwa (GIG) lub firm i przedsiębiorstw geologiczno-wiertniczych. Pozyskane z baz danych PIG-PIB zestawienie otworów wiertniczych należy uzupełnić o dane z innych dokumentów, nieujętych jeszcze w bazach otworów, które zostały np. wykonane na potrzeby opracowania SMGP lub nowo sporządzonych dokumentacji złożowych, hydrogeologicznych i innych. Należy w tym celu przeprowadzić odpowiednią kwerendę w NAG (i innych znanych źródłach informacji geologicznej, takich jak archiwa lokalnych instytucji lub firm wiertniczych) i uzyskać dostęp do wybranych dokumentacji.

Na potrzeby tworzenia bazowego modelu 3D można zebrać i pomocniczo wykorzystać wybrane dane geofizyczne, np. profilowania tomografii elektrooporowej bądź profilowania sejsmiczne, na podstawie których wyznacza się granice (erozyjne, sedimentacyjne, strukturalno-tektoniczne) pomiędzy jednostkami geologicznymi. Informacje z badań geofizycznych są szczególnie cenne w rejonach, gdzie wykonano dotychczas niewielką liczbę otworów wiertniczych. Metody geofizyczne doskonale sprawdzają się np. do wyznaczenia głębokości zalegania zwietrzelin/deluwiów/koluwiów w obszarach górskich. Należy zaznaczyć, że analiza wybranej metody geofizycznej powinna uwzględniać lokalną budowę geologiczną, warunków hydrogeologicznych oraz ograniczenia metody badawczej.

Seryjne geologiczne i hydrogeologiczne opracowania kartograficzne PIG-PIB

PIG-PIB w ramach zadań PSG wykonuje opracowania kartograficzne dla całego kraju, obejmujących całokształt zagadnień z zakresu geologii, hydrogeologii, geologii inżynierskiej, geologii gospodarczej, geofizyki i geochemii. Podstawą tych opracowań jest Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski (SMGP) w skali 1:50 000 obejmuje łącznie 1069 arkuszy – każdy o powierzchni ok. 300 km². Na tym samym podziale arkuszowych bazują także mapy pochodne w tej samej skali: Mapa Hydrogeologiczna Polski (MHP), Mapa geologiczno-gospodarcza Polski (MGGP) i Mapa Geośrodowiskowa Polski (MGŚP). Dane dotyczące map seryjnych są dostępne na portalach internetowych PIG-PIB. Poszczególne arkusze SMGP, MHP, MGGP, MGŚP udostępniane są też jako wydruk ploterowy oraz w formie cyfrowej: rastrowej i wektorowej, natomiast „Objaśnienia...” do map jako wydruki oraz w formie cyfrowej. Zamówienia na mapy można składać za pośrednictwem strony internetowej PIG-PIB lub bezpośrednio do działu dystrybucji wydawnictw Instytutu.

Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski

Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami tekstowymi jest opracowaniem, które kompleksowo opisuje budowę geologiczną kraju uwzględniając litologię, genezę i stratygrafię utworów, geomorfologię oraz tektonikę. Do opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej należy wykorzystać umieszczone na mapie SMGP powierzchniowe wydzielenia geologiczne, dane z otworów wiertniczych, schemat litostratygraficzny i przekroje geologiczne. Dodatkowe informacje o wykonanych wierceniach (zwłaszcza ich profile litologiczne) są zebrane w roboczych materiałach dokumentacyjnych, które służą do autorskiego opracowania arkuszy SMGP. Otwory te, podobnie jak i inne punkty dokumentacyjne, na których oparto treść geo-

logiczną poszczególnych arkuszy, w znacznej mierze wciąż nie są wprowadzone do CBDG.

Mapa Hydrogeologiczna Polski

Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 przedstawia warunki hydrogeologiczne, główny poziom wodonośny i jego zasobność, dynamikę wód oraz ich jakość i różnego rodzaju zagrożenia. Dodatkowo w bazie danych MHP występują warstwy informacyjne przedstawiające pierwszy poziom wodonośny – jego występowanie i hydrodynamikę (MHP-PPW WH). Obejmują one wybrane elementy charakterystyki hydrogeologicznej pierwszej od powierzchni terenu warstwy wodonośnej lub zespołu warstw wodonośnych, wykazujących dobrą łączność hydrauliczną i osiągających łączną miąższość co najmniej 2 m przy średnim stanie retencji wód podziemnych. Charakterystyka obejmuje w szczególności elementy istotne przy ustalaniu związków hydraulicznych pierwszego poziomu wodonośnego z wodami powierzchniowymi, ekosystemami zależnymi od wód podziemnych oraz obiektami zagospodarowania powierzchni terenu. Na potrzeby opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej z bazy MHP należy w szczególności wykorzystać dane o głębokości zalegania wód podziemnych, pozwalające rozróżnić skały suche i zawodnione. Aspekt ten przy tworzeniu MPGN jest istotny z punktu widzenia zdolności regeneracyjnej gruntu w określonym horyzoncie czasu: dzień, miesiąc, rok. Przepływ wód gruntowych zdecydowanie polepsza efektywność wykorzystania ciepła geotermalnego, a co za tym idzie efektywność pracy gruntowej PC i jej ekonomikę, zarówno w trybie grzewczym, jak i chłodzącym.

Mapa Geośrodowiskowa Polski

Mapa Geośrodowiskowa Polski w skali 1:50 000 przedstawia istotny, z punktu widzenia geologii, zbiór danych o środowisku dotyczący: występowania kopalin podstawowych i pospolitych, gospodarki złożami, wybranych elementów: górnictwa i przetwórstwa kopalin,

hydrogeologii i geologii inżynierskiej, ochrony przyrody, krajobrazu i zabytków kultury, stanu geochemicznego powierzchni ziemi oraz możliwości składowania odpadów.

Ważną częścią kwerendy archiwalnej jest zebranie informacji odnośnie lokalizacji i miąższości utworów antropogenicznych, które budują takie formy jak: składowiska odpadów, hałdy, usypiska itp., które zawsze będą stanowić najmłodszą jednostkę tworzonego modelu strukturalnego. Do określenia lokalizacji składowisk odpadów zaleca się korzystanie z MGŚP.

Grunty antropogeniczne

Do ustalenia miąższości utworów antropogenicznych służą dokumenty organów górniczych, starostw, podmiotów prawnych lub innych użytkowników tych obiektów. Jeżeli nie są one dostępne, wówczas na terenie hałd i składowisk wyznacza się przypuszczalną, pierwotną powierzchnię spągu osadów antropogenicznych, a następnie w odniesieniu do NMT, obliczana jest ich miąższość. W przypadku dużych aglomeracji grunty antropogeniczne (nasypy) mogą mieć miąższość na tyle dużą, że będzie ona wpływać na efektywną przewodność termiczną w komórce obliczeniowej modelu parametrycznego. W takich sytuacjach miąższość gruntów antropogenicznych wymaga bardzo dokładnego uwzględnienia w modelu.

Centralna Baza Danych Geologicznych (CBDG)

Centralna Baza Danych Geologicznych to największy w Polsce zbiór danych cyfrowych związanych z naukami o Ziemi. Zawiera m.in. dokumentacje i opracowania geologiczne, informacje na temat otworów wiertniczych, wyniki badań i pomiarów geofizycznych. W bazie zgromadzone są przede wszystkim głębokie otwory badawcze i złożowe. CBDG zawiera wiele podsystemów, spośród których do opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej najważniejsze to: *Otwory wiertnicze*, *Opracowania archiwalne* i *Geofizyka*.

Baza ta stanowi zbiór danych wejściowych (w tym danych cyfrowych), które są podstawą do opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej. Aplikacje internetowe CBDG dają możliwość zaawansowanego wyszukiwania danych zarówno tekstowych jak i przestrzennych (GIS) oraz ich przeglądania. Zasady udostępniania regulują odpowiednie przepisy prawne. Wyczerpująca informacja na ten temat, wraz podaniem ścieżki formalnej procedury wglądu i udostępniania danych, jest dostępna na portalu CBDG.

Podsystem *Otwory wiertnicze* zawiera dane pochodzące z otworów wiertniczych, w tym także informacje o wykonanych w nich badaniach geofizycznych. Zasadnicze znaczenie mają podane tam szczegółowe informacje o profilach stratygraficznych, litologicznych, badaniach geofizycznych i zachowanych rdzeniach wiertniczych, jednak często informacje te są podane tylko dla wybranych, głębszych otworów. W przypadku niektórych otworów przeglądarka umożliwia wyświetlenie profilu w formie graficznej, prezentując wybrane przez użytkownika dane uzyskane z otworu wiertniczego. Dane z podsystemu *Otwory wiertnicze* można importować do baz danych otworowych tworzonych na potrzeby opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej, w postaci arkusza kalkulacyjnego Excel lub bazy danych Access.

Podsystem *Opracowania archiwalne* zawiera dane katalogowe archiwalnych opracowań geologicznych (dokumentacji). Umożliwia on dostęp do rejestru dokumentacji geologicznych zgromadzonych w NAG w Warszawie i jego filiach oraz w oddziałach regionalnych PIG-PIB, a także w innych archiwach w kraju. Dzięki temu podsystemowi można uzyskać wszelkie informacje o analizowanym terenie zawarte w różnego typu dokumentacjach geologicznych, hydrogeologicznych, geofizycznych, złożowych, geotechnicznych i innych. W dokumentacjach tych mogą znajdować się dane o otworach wiertniczych, których nie ujęto do tej pory w podsystemach CBDG, oraz przekroje geologiczne, które mogą zostać wykorzystane na po-

trzeby opracowania modeli 3D i map potencjału geotermii niskotemperaturowej.

Na dzień publikacji niniejszej Instrukcji uzyskanie dostępu on-line do zasobów archiwalnych zgromadzonych w NAG (tj. tekstu i załączników graficznych danej dokumentacji) jest możliwe tylko dla części pozycji. Dostęp do wybranych dokumentacji i zawartych w nich szczegółowych danych regulują odpowiednie przepisy, dostępne na stronach NAG pod adresem <https://www.pgi.gov.pl/narodowe-archiwum-geologiczne.html>.

Podsystem *Geofizyka*, zawiera dane o wykonanych badaniach geofizycznych z podziałem dokumentacji źródłowych na opracowania geofizyczne: elektrooporowe, grawimetryczne, magnetyczne, radiometryczne, sejsmiczne i spektrometryczne. Należy pamiętać, że niewskazane jest wykorzystywanie (jak również wykonywanie) badań geofizycznych w obszarach, dla których pomiary mogą być zakłócone. Są to głównie miejsca występowania infrastruktury naziemnej i podziemnej, miejsca z możliwą podwyższoną mineralizacją wód podziemnych oraz miejsca o bardzo dużych zmianach wysokości (wysokie skarpy). Podczas reinterpretacji archiwalnych danych geofizycznych należy zwrócić uwagę na ewentualną obecność takich obszarów i uwzględnić poprawkę na możliwe zakłócenia obrazu dokumentowanego podłoża skalno-gruntowego. Zagadnienia te zostały szczegółowo opisane w publikacji: *Badania geologiczno-inżynierskie – Geofizyka Inżynierska* (Ostrowski i in., 2023).

Właściwe warstwy informacyjne przeglądarki geograficznej podsystemu *Geofizyka* pozwalają poznać lokalizację obszarów, dla których wykonano dokumentację geofizyczną, jak również liniową lub punktową lokalizację samych pomiarów geofizycznych ujętych w szeregu warstw tematycznych. Na potrzeby opracowania map geotermalnych zaleca się uzyskanie zezwoleń na udostępnienie dokumentacji, w których umieszczono przekroje geofizyczne ze zinterpretowaną budową geologiczną, lub innych danych, które po przetworzeniu umożliwiłyby konstrukcje takich przekrojów. Dane te pozwalają na uzyskanie informacji niezbędnych do za-

projektowania badań geofizycznych w taki sposób, aby nie dublować punktów badawczych.

Centralna Baza Danych Hydrogeologicznych (CBDH)

Centralna Baza Danych Hydrogeologicznych to baza gromadząca dane hydrogeologiczne (w tym hydrodynamiczne i hydrogeochemiczne) o ujęciach wód podziemnych. Zasoby bazy zawierają profile litologiczne studni i ujęć wód podziemnych. Ze względu na głębokość rozpoznania (otwory z CBDH mają przeważnie od kilkudziesięciu do 200 m głębokości) oraz znaczącą liczbę otworów na terenie całego kraju, baza ta jest podstawowym źródłem informacji geologicznej na potrzeby projektowania otworowych wymienników ciepła i oceny potencjału geotermii niskotemperaturowej. Aplikacja internetowa CBDH daje możliwość zaawansowanego wyszukiwania danych przestrzennych (GIS). Zasady udostępniania regulują odpowiednie przepisy prawne. Wyczerpująca informacja na ten temat, wraz podaniem ścieżki formalnej procedury wglądu i udostępniania danych, jest dostępna na portalu CBDH.

Baza Danych Geologiczno-Inżynierskich

Baza Danych Geologiczno-Inżynierskich to największy w Polsce zbiór cyfrowych danych geologiczno-inżynierskich niezbędnych do projektowania inwestycji. Baza zawiera informacje z dokumentacji geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych uzyskanych z NAG, archiwów prywatnych przedsiębiorstw oraz kartowania terenowego. Baza BDGI zawiera głównie otwory płytkie, o głębokości średnio do 10 m (choć zdarzają się też otwory głębsze oraz głębokie >100 m), a ich lokalizacja jest skoncentrowana na obszarach miejskich oraz na terenach aglomeracji miejskich.

Podkłady i produkty kartograficzne

Do opracowania modelu 3D i map potencjału geotermii niskotemperaturowej wykorzystuje

się różne podkłady map topograficznych o požądanej dokładności oraz numeryczne modele terenu (NMT). O zasobach dostępnych map topograficznych i sposobach ich udostępniania informują centralny i regionalne (wojewódzkie) ośrodki dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej. W ich zasobach znajdują się materiały i zbiory danych obejmujące: bazę danych obiektów topograficznych, mapy topograficzne (m.in. w skalach: 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000), mapy hydrograficzne, mapy sozologiczne, ortofotomapy i inne. Zaleca się korzystanie z cyfrowych map topograficznych w skali 1:50 000 oraz numerycznych modeli terenu o wysokiej rozdzielczości. NMT wykorzystywany do modelowania 3D w wersji źródłowej powinien mieć jak największą dokładność, większą niż rozdzielczość modelowania 25×25 m. Do takich zastosowań najlepiej nadają się modele z zasobu Informacyjnego Systemu Osłony Kraju (ISOK).

Archiwalne wyniki pomiarów przewodności termicznej

W trakcie wstępnego etapu przygotowywania danych, na podstawie różnego rodzaju źródeł literaturowych i archiwalnych, w tym z pomiarów laboratoryjnych, należy zebrać, w formie wzorcowej tabeli, wartości pomiarowe przewodności termicznej reprezentatywnych typów petrograficznych skał występujących na badanym obszarze. Wartości te powinny być podane dla skał w stanie suchym i zawodnionym. Archiwalne wyniki pomiarów przewodności termicznej gruntów i skał mogą stanowić istotny wkład do zestawienia wartości przewodności termicznej podstawowych typów petrograficznych gruntów i skał, przedstawionego w załączniku 1.

4.2. BADANIA PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ GRUNTÓW I SKAŁ

Badania przewodności termicznej skał ukazują bardzo duże wahania ich wartości nawet w przypadku skał o tym samym typie petrograficznym. Spowodowane jest to znaczącym wpływem ich specyficznych własności fizycznych,

takich jak: skład mineralny, porowatość, stopień spękania i zwietrzenia oraz zawartość wody, która istotnie zwiększa przewodność termiczną skał, szczególnie luźnych gruntów oraz skał słabo skonsolidowanych, porowatych i spękanych (Łukawska, Żeruń, Ryżyński 2021). W celu jak najbardziej wiarygodnego określenia właściwości termicznych podłoża na badanym obszarze, należy przeprowadzić opróbowanie gruntów i skał w naturalnych lub sztucznych odsłonięciach (wrazie dostępności także rdzeni wiertniczych), a następnie dokonać nowych pomiarów przewodności termicznej w stanie suchym i zawodnionym. Pomiary tego typu można przeprowadzić w warunkach laboratoryjnych przy użyciu szerokiego spektrum metod badawczych, omówionych w niniejszym rozdziale, np. za pomocą sondy stacjonarnej do pomiaru przewodności termicznej w stanie ustalonym (steady state) typu FO×50, a także *in situ*, tzw. metodą igły termicznej w stanie nieustalonym (non-steady state), np. za pomocą aparatu KD2Pro lub Tempos (Decagon Devices, 2012; METER Group, 2018). Liczba wykonanych pomiarów zależy od ilości wyróżnionych na danym arkuszu wydzieleń serii geologiczno-termalnych i reprezentatywnych typów petrograficznych skał w ich obrębie. Zalecana liczba prób (tak aby parametryzacja warstwy była istotna statystycznie) wynosi od 30 do 100 na SGT (samych pomiarów może być więcej, np. dla skał zwięzłych powinno się wykonać pomiary w dwóch kierunkach, np. wzdłuż i prostopadle do warstwowania/foliacji). Nowo uzyskane pomiary należy zebrać w tabeli, której przykładowy wzór stanowi załącznik 2. Dla typów skał, których reprezentatywnych prób nie udało się opróbować i pomierzyć w terenie, należy zastosować przybliżone wartości przewodności termicznej dla podobnych litologii pozyskane z dostępnej literatury lub wykorzystać dostępne wzory przeliczeniowe oparte o parametry fizyczne.

Zestawienie zalecanych metod pomiarów przewodności termicznej w zależności od litologii i rodzaju badania zamieszczono w tabeli 2.

W materiale skalnym o słabej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (podgrupa A, tab. 2) istnieje możliwość wykonania otworu pod son-

Tabela 2. Zalecane metody wyznaczania przewodności termicznej gruntów i skał w zależności od litologii i rodzaju badania

Rodzaj badań		Litologia	Zalecane metody badawcze						
			Metoda igły termicznej w stanie nieustalonym (non-steady state)						
			analizator właściwości termicznych KD2 Pro, Tempos		miernik przewodności termicznej TK04		miernik przewodności termicznej Hukseflux	sonda stacjonarna FOX50	
sonda typu TR	sonda typu RK	sondy dyskowe HLQ	sonda igłowa VLQ						
Badania terenowe (in situ)	Opis materiału skalnego pod względem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wg PN-EN ISO 14689:2018-05	A	skrajnie słaba bardzo słaba słaba umiarkowanie słaba	+	n/d	n/d	–	n/d	
		B	średnio mocna mocna bardzo mocna skrajnie mocna	+	n/d	n/d	–	n/d	
	Grupa gruntów zgodnie z PN-EN ISO 14688-1:2018-05	grunty drobnoziarniste (spoisite)		+	-	n/d	n/d	+	n/d
		grunty gruboziarniste (niespoiste)		+	+/-	n/d	n/d	+	n/d
Badania laboratoryjne	Opis materiału skalnego pod względem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wg PN-EN ISO 14689:2018-05	A	skrajnie słaba bardzo słaba słaba umiarkowanie słaba	+	+/-	-	n/d	-	
		B	średnio mocna mocna bardzo mocna skrajnie mocna	+	+	-	n/d	+	
	Grupa gruntów zgodnie z PN-EN ISO 14688-1:2018-05	grunty drobnoziarniste (spoisite)		+	-	-	+	n/d	+
		grunty gruboziarniste (niespoiste)		+	+	-	+	n/d	-

+ zalecana metoda wyznaczania przewodności termicznej; – metoda niezalecana; +/- metoda użyteczna w wybranych przypadkach; n/d nie dotyczy

dę igłową za pomocą wiertarki, bez naruszenia naturalnej struktury skały. Do oznaczania przewodności termicznej skał miękkich *in situ* rekomendowana jest metoda igły termicznej w stanie nieustalonym z użyciem sondy igłowej typu RK.

Pomiar przewodności termicznej skał o słabej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w warunkach laboratoryjnych należy prowadzić metodą igły termicznej w stanie nieustalonym z użyciem sondy igłowej typu RK. Jeżeli istnieje możliwość wycięcia jednorodnego bloku skały o odpowiednich wymiarach, badanie laboratoryjne wykonuje się metodą igły termicznej w stanie nieustalonym z użyciem sond dyskowych typu HLQ lub metodą pomiaru przewodności termicznej w stanie ustalonym na stacjonarnej sondzie FOX50.

Należy mieć na uwadze, że w przypadku niektórych skał o słabej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (podgrupa A, tab. 2) nie istnieje możliwość poboru reprezentatywnej próbki do badań laboratoryjnych z uwagi na ich nietrwałą strukturę (np. łupki ilaste). W takim wypadku należy zapewnić liczbę pomiarów terenowych zgodną z wytycznymi Instrukcji.

W materiale skalnym o mocnej wytrzymałości (podgrupa B, tab. 2) na jednoosiowe ściskanie wywiercenie odpowiedniego otworu pod sondę igłową przysparza znacznych trudności, a badanie przewodności termicznej *in situ* często nie jest technicznie możliwe. Do laboratoryjnych badań tych skał zaleca się używać sond

dyskowych typu HLQ (metoda igły termicznej w stanie nieustalonym) lub stacjonarnej sondy FOX50 (pomiar przewodności termicznej w stanie ustalonym).

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku braku rzeczywistych pomiarów przewodności termicznej skał jedynym rozwiązaniem jest posiłkowanie się archiwalnymi pomiarami przewodności termicznej dla litotypów o zbliżonych własnościach petrograficznych i petrofizycznych – wykorzystuje się wtedy zestawienia wartości referencyjnych (ang. *lookup table*). W przypadku ich stosowania należy się jednak liczyć z możliwością popełnienia większej liczby błędów w oszacowaniach średnich wartości przewodności w interwałach obliczeniowych MPGN. Błędy takie dla danej serii SGT mogą wpłynąć na jakość oszacowania efektywnej przewodności termicznej na obszarze występowania sparametryzowanych w ten sposób serii SGT. Biorąc pod uwagę cel, jakim jest opracowanie wynikowych map przewodności termicznej w zadanych przedziałach głębokościowych, oraz dokonując oceny wartości referencyjnych przewodności termicznej z wykorzystaniem literaturowych lub archiwalnych zestawień, powinno się dążyć do ostrożnego oszacowania parametru. Należy przydzielić bezpieczną wartość przewodności termicznej dla SGT, analizując jej wpływ na finalną wartość efektywnej przewodności termicznej w profilu komórek obliczeniowych modelu w zasięgu danej SGT. Dane z nowych badań przewodności termicznej, wykonywanych na potrzeby sporządzania modeli geologicznych MPGN, zaleca się archiwizować w taki sposób, aby w przyszłości mogły być włączone do Centralnej Bazy Właściwości Termicznych Gruntów i Skał.

4.2.1. Pomiary przewodności termicznej w warunkach terenowych

Terenowe pomiary właściwości termicznych gruntów należy prowadzić w miejscach nienasłonecznionych. Optymalnym czasem do prowadzenia pomiarów przewodności termicznej *in situ* jest wiosna oraz jesień, kiedy wahania



Ryc. 4. Analizator właściwości termicznych Tempos z zestawem sond igłowych do pomiarów przewodności termicznej różnych rodzajów materiałów

temperatury powietrza w ciągu doby są najmniejsze.

Należy dołożyć wszelkich starań, aby badania terenowe prowadzić wyłącznie na świeżych próbkach skał, pozbawionych widocznych oznak wietrzenia.

W przypadku wyczerpania możliwości uzyskania wyniku przewodności termicznej świeżego materiału skalnego, dopuszcza się wykonanie badania na próbkach zwietrzałych lub spękanych. Fakt ten należy odnotować na kartach pomiarowych oraz uwzględnić na etapie interpretacji wyniku.

W przypadku gdy zwietrzeliny stanowią miąższy pakiet reprezentujący SGT należy przeprowadzić badania na próbkach zwietrzałych reprezentatywnych dla tego wydzielenia. Zaleca się określić stopień zwietrzenia masywu skalnego zgodnie z PN-EN ISO 14689:2018-05. Niezbędnymi elementami pracy jest wyznaczenie dokładnej lokalizacji za pomocą systemu GPS wraz z zanotowaniem współrzędnych XY oraz wykonanie dokumentacji fotograficznej każdego punktu pomiarowego.

Badania przewodności termicznej w warunkach terenowych zaleca się wykonywać przy użyciu analizatora właściwości termicznych typu KD2 Pro, Tempos lub równoważnych (ryc. 4), z zastosowaniem sond igłowych dostosowanych do spodziewanych warunków geologicznych (tab. 2).

Terenowe pomiary przewodności termicznej gruntów

Do pomiarów przewodności termicznej gruntów przeznaczona jest sonda typu TR. W przypadku gruntów gruboziarnistych (żwir, pospółki) może być konieczne użycie sondy o większej średnicy (typ RK, dedykowanej do tego typu gruntów oraz skał).

Pomiar przewodności gruntów nie wymaga użycia wiertarki. Wytypowany do badań grunt należy odsłonić szpadłem na żądanej głębokości. Sondę igłową należy wprowadzić w grunt ruchem jednostajnym (ryc. 5). Po wprowadzeniu sondy do gruntu nie należy zmieniać jej położe-

nia. Przed rozpoczęciem pomiarów przewodności termicznej należy odczekać minimum 15 minut na ustabilizowanie się temperatury między igłą a badaną próbką. Powtórzyć pomiary minimum 3 razy w każdym punkcie, nie zmieniając położenia sondy. Za prawidłowe przyjmuje się 3 kolejne wyniki nie różniące się od siebie o więcej niż 10%.

Przez cały czas prowadzenia pomiarów przewodności termicznej należy monitorować temperaturę powietrza termometrem zewnętrznym.

W miarę możliwości należy pobrać próbki gruntów do badań laboratoryjnych.

Igła termiczna na lancy stalowej – urządzenie typu Hukseflux

Urządzeniem dedykowanym do terenowych pomiarów przewodności termicznej gruntów w otworze jest miernik przewodności termicznej typu Hukseflux (ryc. 6).

Miernik posiada igłę termiczną do pomiaru przewodności termicznej w stanie nieustalonego przepływu ciepła. Igła termiczna umieszczona jest na lancy o długości 1,5 m, co pozwala na wykonanie pomiarów w otworze o małej średnicy.

Przed wykonaniem pomiaru w badanym podłożu należy wywiercić otwór o średnicy min. 30 mm. Otwór można wykonać np. sondą okienkową. Następnie wprowadza się lancę do otworu i wbija igłę w jego dno. Igłę powinno się w całości umieścić w gruncie. Przed rozpoczęciem pomiaru należy odczekać 15 minut, aby temperatura igły wyrównała się z temperaturą otaczającego ją gruntu. Odczyty wyników prowadzi się z jednostki sterującej. Należy powtórzyć pomiary minimum 3 razy w każdym otworze, nie zmieniając położenia sondy. Za prawidłowe przyjmuje się 3 kolejne wyniki nie różniące się od siebie o więcej niż 10%.

Przed każdą serią pomiarów należy wykonać pomiar sprawdzający w materiale referencyjnym (o znanej przewodności termicznej), w celu zweryfikowania poprawności działania urządzenia, a następnie obliczyć współczynnik kalibracji C (ASTM D5334-22).



Ryc. 5. Pomiar przewodności termicznej *in situ* w gruntach czwartorzędowych

Terenowe pomiary przewodności termicznej skał

Do pomiarów przewodności termicznej skał rekomendowana jest sonda igłowa typu RK-3 o zwiększonej średnicy (ryc. 7).

Przed rozpoczęciem pomiarów przewodności termicznej *in situ* konieczne jest odsłonięcie świeżych i możliwie jednorodnych fragmentów skały (ryc. 8).

Na etapie badań terenowych należy odnotować cechy nieciągłości masywu skalnego (rozstaw, powtarzalność i zasięg, rozwarcie, wypełnienie szczelin, liczba systemów spękań), które mogą mieć wpływ na wynik przewodności termicznej. Opis ten zaleca się wykonywać na podstawie wytycznych aktualnie obowiązującej wersji normy PN-EN ISO 14689:2018-05.

Stopień zwietrzenia masywu skalnego należy opisać w 6-stopniowej skali wg tabeli 6 normy PN-EN ISO 14689:2018-05, uwzględniając wszelkie zmiany jego pierwotnej struktury: przebarwienia oraz stopień rozpadu i rozkładu materiału skalnego.



Ryc. 6. Pomiar przewodności termicznej gruntu w otworze za pomocą terenowej sondy igłowej typu Hukseflux

Metodę badania przewodności termicznej wybiera się na podstawie proporcji świeżych i zwietrzałych składników skały macierzystej. Zalecane metody badawcze w zależności od stopnia zwietrzenia zostały wskazane w tabeli 5.

W skałach o teksturze kierunkowej i warstwowanych (gnejsy, łupki krystaliczne i osadowe) należy w miarę możliwości zaplanować wykonanie serii pomiarów przewodności termicznej w kierunkach prostopadłym oraz równoległym do laminacji.

Przed serią pomiarów należy wykonać pomiar sprawdzający na materiale wzorcowym o znanej przewodności termicznej, a następnie obliczyć współczynnik kalibracji C (ASTM D5334-22).

W odsłoniętej skale należy wywiercić wiertarką otwór o głębokości i średnicy minimalnie większej niż wymiary wybranej sondy igłowej (ryc. 9). Następnie przy pomocy sprężonego powietrza oczyścić otwór z urobku powstałego przy wierceniu.



Ryc. 7. Analizatory właściwości termicznych Tempos i KD2 Pro z igłami typu RK do pomiaru przewodności termicznej skał

Otwór po wierceniu powinien wystygnąć do temperatury otoczenia. Należy mieć na uwadze, że w przypadku wykonywania otworów w skałach o wysokiej twardości (np. skały zbiornikowe o spoiwie krzemionkowym, kwarcyty) rozpoczęcie pomiarów przewodności termicznej



Ryc. 8. Pomiar przewodności termicznej łupków fliszowych w odsłoniętym odsłonięciu



Ryc. 9. Wiercenie otworu pod sondę igłową w łupkach fliszowych

może być możliwe dopiero po kilku godzinach od wykonania otworu. Przez cały czas prowadzenia pomiarów należy monitorować temperaturę otoczenia termometrem zewnętrznym.

Do oczyszczonego otworu należy zaaplikować cienką warstwę pasty termoprzewodzącej i wprowadzić igłę termiczną. Po wprowadzeniu sondy do otworu nie należy zmieniać jej położenia. Przed rozpoczęciem pomiarów przewodności termicznej należy odczekać minimum 15 minut na ustabilizowanie się temperatury między igłą a badaną próbką. Powtórzyć pomiary minimum 3 razy w każdym otworze, nie zmieniając położenia sondy. Za prawidłowe przyjmuje się 3 kolejne wyniki nie różniące się od siebie o więcej niż 10%.

Przed rozpoczęciem pomiarów w kolejnym punkcie sondę należy wyczyścić z pozostałości pasty termoprzewodzącej.

W miarę możliwości należy pobrać próbki skał do badań laboratoryjnych.

4.2.2. Laboratoryjne pomiary przewodności termicznej gruntów

Metoda igły termicznej w stanie nieustalonym (*non-steady state*)

Laboratoryjne pomiary przewodności termicznej gruntów prowadzi się na próbkach o nienaruszonej strukturze (NNS), o naturalnej wilgotności (NW) lub wysuszonych do stałej masy.

Preferowane do badań przewodności termicznej są próbki pobrane w sposób zapewniający zachowanie naturalnej wilgotności i struktury gruntu *in situ* (NNS, klasa jakości A/1).

Przed rozpoczęciem pomiaru przewodności termicznej gruntów zaleca się wykonać badania właściwości fizycznych gruntu, mających największy wpływ na parametry termiczne, tj.: wilgotność naturalną, gęstość objętościową, skład granulometryczny oraz oznaczenie zawartości substancji organicznej (dla gruntów organicznych) (Łukawska i in., 2021). Badania uzupełniające należy wykonywać zgodnie z obowiązującymi normami branżowymi, standardami technicznymi i/lub procedurami badawczymi.

Do czasu rozpoczęcia badania przewodności termicznej próbki NNS i NW należy zabezpieczyć przed utratą wilgoci np. przez owinięcie folią streczową oraz umieścić je w lodówce. Przystępując do badań, przygotowane próbki należy umieścić w inkubatorze termicznym lub pomieszczeniu, w którym będzie wykonywane badanie właściwości termicznych, na minimum 24 h przed rozpoczęciem pomiarów.

Laboratoryjne pomiary przewodności termicznej zaleca się prowadzić w inkubatorze termicznym i/lub w klimatyzowanym pomieszczeniu, w którym możliwe jest utrzymanie stałej temperatury otoczenia w trakcie całego cyklu pomiarowego (ryc. 10, 13).

Próbki NNS po wyciśnięciu z próbnika nie wymagają przygotowania do prowadzenia pomiarów przewodności termicznej. Probki NW należy uformować w cylindrze lub innym naczyniu o sztywnych ścianach w taki sposób, aby właściwości fizyczne charakteryzujące uzyskaną

próbki były jak najbliższe parametrom gruntu *in situ* (ryc. 11).

W celu oznaczenia przewodności termicznej gruntu suchego, próbkę należy suszyć w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 105–110°C przez 12–72 h do uzyskania stałej masy. Po wysuszeniu próbkę należy odstawić do ostygnięcia, a następnie umieścić w inkubatorze termicznym w celu uzyskania równowagi temperaturowej z otoczeniem.

Badania wykonywane są za pomocą analizatora właściwości termicznych KD2 Pro, Tempos (ryc. 4, 13) lub analogicznych. Do pomiarów przewodności termicznej gruntów rekomendowane jest użycie sondy typu TR. W przypadku gruntów gruboziarnistych (żwir, pospółki) może być konieczne użycie sondy o większej średnicy (typ RK).

Przed rozpoczęciem serii pomiarów przewodności termicznej należy wykonać pomiar testowy z użyciem materiału o znanej przewodności termicznej (ryc. 12), a następnie obliczyć współczynnik kalibracji C (ASTM D5334-22).

W przypadku badania na próbkach o naruszonej strukturze należy wypełnić gruntem całą objętość cylindra, a następnie wprowadzić sondę igłową w centralną część powierzchni ścięcia próbki tak, aby z każdej strony między próbką a ścianą naczynia pozostało minimum 2 cm gruntu. Sondę należy wprowadzić w całości w próbkę, jednostajnym ruchem, bez obracania igły. Odczekać 15 minut w celu wyrównania temperatury igły z temperaturą próbki. Powtórzyć pomiar przewodności termicznej minimum 3 razy na każdej próbce, nie zmieniając położenia igły. Minimalny odstęp między kolejnymi pomiarami powinien wynosić 15 minut (PB-102/CBGS; PB-103/CBGS).

Za prawidłowe przyjmuje się 3 kolejne wyniki nie różniące się od siebie o więcej niż 10%. Wynik stosowany do dalszych obliczeń to średnia arytmetyczna z tych pomiarów.

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych przewodności termicznej gruntów można stwierdzić, że parametr wykazuje znaczną zmienność w obrębie jednej litologii w zależ-



Ryc. 10. Pomiar przewodności termicznej gruntów spoiстых w inkubatorze termicznym



Ryc. 11. Stalowy cylinder z widelkami do formowania próbek gruntów niespoistych



Ryc. 12. Pomiar sprawdzający w glicerynie

ności od stopnia nasycenia gruntu wodą i jego gęstości objętościowej (tab. 3 i 4).

Dostępne w literaturze wartości przewodności termicznej dla poszczególnych rodzajów gruntów (w tym w wytycznych Polskiej Organizacji Rozwoju Technologii Pomp Ciepła, PORT PC 2013, 2021) są niewystarczająco dokładne, aby na ich podstawie parametryzować SGT. Po-



dane w wytycznych zakresy przewodności termicznej są szerokie. Klasyfikacja PORT PC nie uwzględnia także wszystkich rodzajów gruntów, jakie występują na obszarze kraju, ale grupuje je w kategorie. Na podstawie dotychczas wykonanych laboratoryjnych badań przewodności termicznej gruntów można stwierdzić, że efektywna przewodność termiczna charakteryzuje się znaczną zmiennością w obrębie jednego rodzaju gruntu w zależności od jego gęstości objętościowej i stopnia nasycenia wodą (tab. 3 i 4). Zaleca się każdorazowe wykonywanie terenowych i laboratoryjnych badań przewodności termicznej podłoża gruntowego (ryc. 14).

4.2.3. Laboratoryjne pomiary przewodności termicznej skał

Pomiary właściwości termicznych skał należy prowadzić w inkubatorze termicznym lub innym szczelnym urządzeniu, umożliwiającym utrzymanie stałej temperatury i wilgotności podczas całego cyklu pomiarowego. Zaleca się, aby badana próbka znalazła się w inkubatorze termicznym lub pomieszczeniu, w którym wykonywane są oznaczenia przewodności ter-



Ryc. 13. Pomiar przewodności termicznej gruntów niespoistych w inkubatorze termicznym

Tabela 3. Wyniki laboratoryjnych pomiarów przewodności termicznej różnych typów gruntów niespoistych (próbki formowane) Łukawska i in. 2020

Rodzaj gruntu	Zawartość ziaren o średnicy [%]			Wilgotność	Stopień zagęszczenia I_D	Przewodność termiczna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Kategoria PORT PC
	2 mm >	0,5 mm >	0,25 mm >				
pospółka	12	65	83	suchy	zagęszczony	0,473 0,474 0,475	2
				wilgotność naturalna	zagęszczony	2,814 2,817 2,834	3
				w pełni nasycony wodą	zagęszczony	3,227 3,270 3,293	4
piasek średni	0	5	57	suchy	luźny	0,246 0,246 0,246	1
					średnio zagęszczo- ny	0,279 0,280 0,286	1
					zagęszczony	0,335 0,350 0,351	2
				wilgotność naturalna	luźny	2,392 2,406 2,407	3
					średnio zagęszczo- ny	2,523 2,541 2,542	3
					zagęszczony	2,630 2,634 2,640	3
				w pełni nasycony wodą	luźny	2,822 2,826 2,827	4
					średnio zagęszczo- ny	2,920 3,013 3,038	4
					zagęszczony	3,112 3,122 3,147	4
piasek gruby	1	97	100	suchy	zagęszczony	0,324 0,324 0,325	2
				wilgotność naturalna	zagęszczony	1,871 1,886 1,888	3
				w pełni nasycony wodą	zagęszczony	2,732 2,739 2,715	4
żwir	86	95	96	suchy	zagęszczony	0,229 0,232 0,234	5
				wilgotność naturalna	zagęszczony	1,878 1,826 1,827	5
				w pełni nasycony wodą	zagęszczony	2,831 2,866 2,878	6
piasek drobny	0,03	0,93	28,98	suchy	zagęszczony	0,307 0,307 0,310	1
				wilgotność naturalna	zagęszczony	1,096 1,096 1,109	3
				w pełni nasycony wodą	zagęszczony	2,875 2,875 2,927	4

Tabela 4. Wyniki laboratoryjnych pomiarów przewodności termicznej różnych typów gruntów spoistych (próbki formowane), Łukawska i in. 2020

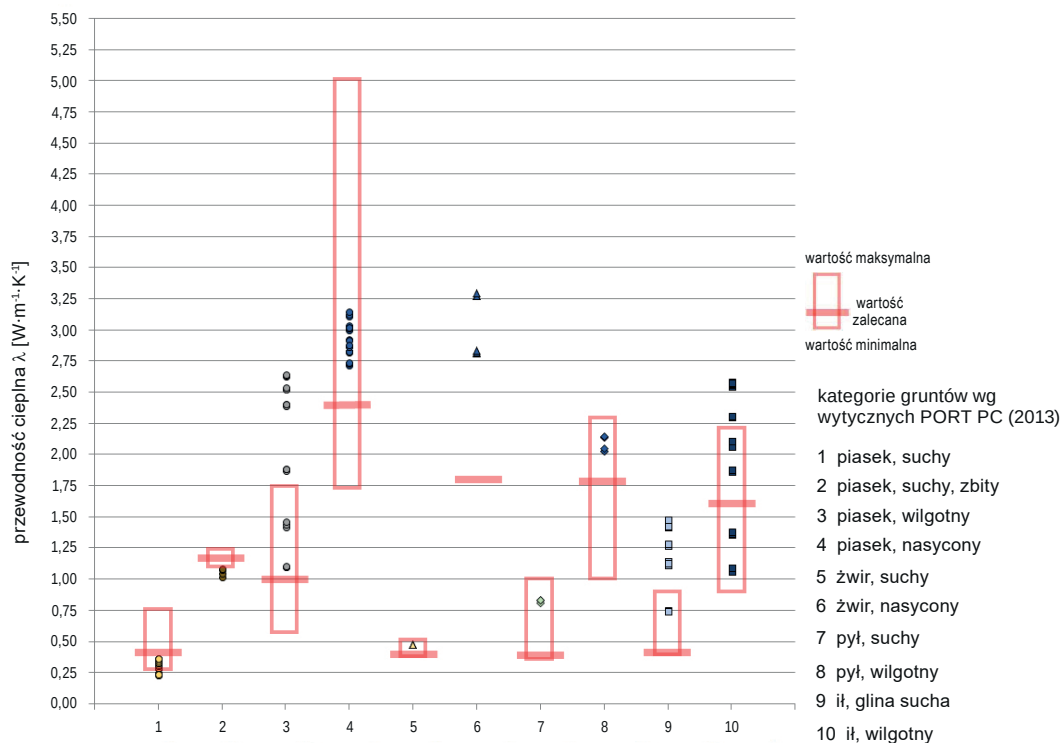
Rodzaj gruntu	Zawartość ziaren o średnicy [%]				Wilgotność [%]	Konsystencja	Przewodność termiczna λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Kategoria PORT PC
	$> 2 \text{ mm}$	$2,0 - 0,5 \text{ mm}$	$0,05 - 0,002 \text{ mm}$	$< 0,002 \text{ mm}$				
pył	0	30	60	10	< 2	bardzo zwarta	0,809 0,828 0,833	7
					27,0	twardoplastyczna	2,139 2,141 2,143	8
gлина piaszczysta	0	65	17	18	< 2	bardzo zwarta	1,141 1,145 1,145	9
					18,3	zwarta	2,547 2,564 2,586	10
gлина piaszczysta	0	59	21	20	< 2	bardzo zwarta	1,421 1,423 1,475	9
					13,7	zwarta	2,566 2,571 2,578	10
gлина piaszczysta	0	56	25	18	< 2	bardzo zwarta	1,112 1,117 1,129	9
					16,4	zwarta	2,065 2,107 2,111	10
ił	2	18	34	46	< 2	bardzo zwarta	0,744 0,749 0,746	9
					22,9	zwarta	1,861 1,875 1,880	10
					38,0	plastyczna	1,359 1,367 1,382	10
					51,2	miękkoplastyczna	1,061 1,089 1,061	10

micznej na minimum 24 h przed rozpoczęciem pomiarów. Do wykonywania badania stosuje się miernik przewodności termicznej TK04 (ryc. 15) wyposażony w sondy planarne typu HLQ (TeKa, 2019).

Przed rozpoczęciem badania przewodności termicznej skał należy wykonać opis makrosko-

powy i klasyfikację badanej skały zgodnie z aktualną wersją normy PN-EN ISO 14689:2018-05.

Pomiary prowadzi się na próbkach w stanie powietrznosuchym oraz na próbkach w pełni nasyconych wodą. Przez próbkę w pełni nasyconą wodą rozumie się skałę, która pozostawała w całości zanurzona w wodzie minimum 28 dni.



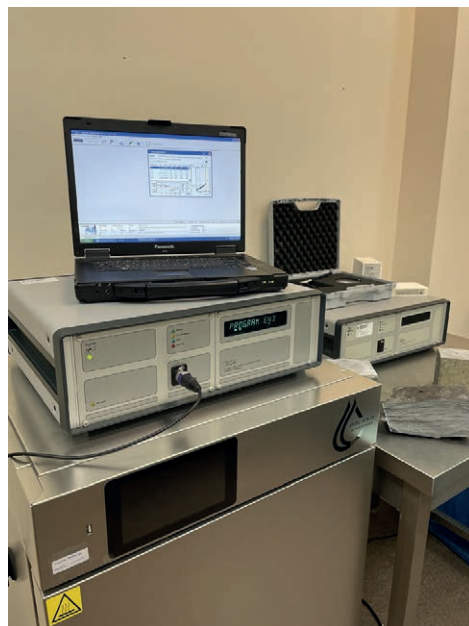
Ryc. 14. Wyniki laboratoryjnych pomiarów przewodności termicznej gruntów w zestawieniu z wytycznymi PORT PC (Łukawska i in., 2020)

Próbka powinna zostać przycięta na pile tarczowej do kształtu prostopadłościanu lub walca w taki sposób, aby zapewnić dwie możliwie płaskie i równoległe do siebie powierzchnie. Wymiary próbki dostarczonej do laboratorium powinny pozwolić na jej przycięcie na pile tarczowej do rozmiarów minimum:

- średnica: 90 mm, wysokość: 20 mm (w przypadku wykonywania pomiarów sondą typu standard HLQ),
- średnica: 50 mm, wysokość: 20 mm (dla sondy typu mini HLQ), rycina 16.

Należy dołożyć wszelkich starań, aby zarówno terenowe, jak i laboratoryjne badania przewodności termicznej prowadzić wyłącznie na świeżych próbkach skał, pozbawionych widocznych oznak wietrzenia.

W sytuacji wyczerpania możliwości uzyskania wyniku ze świeżego materiału skalnego, dopuszcza się wykonanie badania na próbkach zwietrzałych lub spękanych.



Ryc. 15. Miernik przewodności termicznej TK04



Ryc. 16. Próbkę skal przygotowane do pomiarów przewodności termicznej miernikiem TK04

Fakt ten należy odnotować na kartach pomiarowych oraz uwzględnić na etapie interpretacji wyniku.

W przypadku gdy zwietrzliny stanowią mięszczy pakiet reprezentujący SGT, należy przeprowadzić badania na próbkach zwietrzałych reprezentatywnych dla tego wydzielenia oraz określić stopień zwietrzenia masywu skalnego zgodnie z PN-EN ISO 14689:2018-05.

Na etapie badań laboratoryjnych należy odnotować cechy nieciągłości masywu skalnego widoczne w próbce (rozstaw, powtarzalność i zasięg, rozwarcie, wypełnienie szczelin, liczba systemów spękań), które mogą mieć wpływ na otrzymany wynik przewodności termicznej. Opis ten zaleca się wykonywać na podstawie wytycznych aktualnie obowiązującej wersji normy PN-EN ISO-14689:2018-05.

W przypadku prób skał uzyskiwanych z wiercenia rdzeniowanego, zaleca się określenie i zanotowanie wskaźnika spękania masywu (RQD) na podstawie rdzenia wiertniczego zgodnie z PN-EN ISO 14689:2018-05. Do badania należy wybierać możliwie najmniej naruszone fragmenty rdzenia.

Stopień zwietrzenia masywu skalnego zaleca się opisać w 6-stopniowej skali wg tabeli 6 normy PN-EN ISO 14689:2018-05, uwzględniając wszelkie zmiany jego pierwotnej struktury: prze-

barwienia oraz stopień rozpadu i rozkładu materiału skalnego.

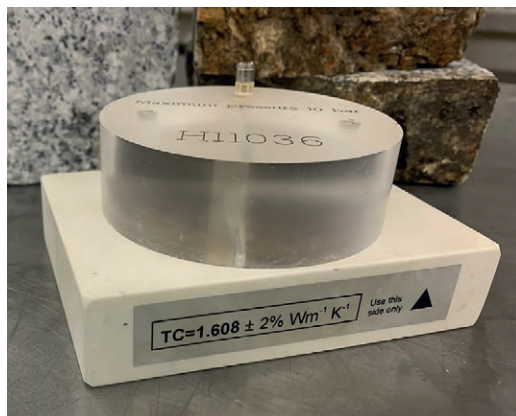
Metodę badania przewodności termicznej wybiera się na podstawie proporcji świeżych i zwietrzałych składników skały macierzystej. Zalecane metody badawcze w zależności od stopnia zwietrzenia zostały wskazane w tabeli 5.

Wytyczne normy PN-EN ISO 14689:2018-05, wg których należy określać stopień zwietrzenia masywu skalnego, zamieszczono w tabeli 6.

Do parametryzacji serii geologiczno-termalnych na podstawie pomiarów skał o zmiennej strukturze uzyskaną wartość przewodności termicznej, należy skorygować o odpowiedni współczynnik korekcyjny o wielkości zależnej od stwierdzonego stopnia zwietrzenia i/lub spękania skały.

Wyjątek stanowią występujące lokalnie pokrywy zwietrzelinowe o znacznej miąższości (Sudety i Karpaty, Góry Świętokrzyskie, Jura Krakowsko-Częstochowska). Na tych obszarach konieczne jest wydzielenie utworów zwietrzelinowych w oddzielnej serii geologiczno-termalnej oraz ich sparаметryzowanie wg wytycznych Instrukcji.

Przed rozpoczęciem serii pomiarów należy wykonać pomiar testowy z użyciem materiału wzorcowego o znanej przewodności termicznej (ryc. 17), a następnie obliczyć współczynnik kalibracji C (ASTM D5334-22).



Ryc. 17. Sonda dyskowa typu HLQ z materiałem wzorcowym do pomiarów sprawdzających

Tabela 5. Zalecane metody oznaczania wartości przewodności termicznej gruntów i skał na próbkach zwietrzałych i spękanych

Określenie stopnia zwietrzenia masywu skalnego zgodnie z PN-EN ISO 14689:2018-05			Zalecane metody badawcze							Pomiar przewodności termicznej w stanie ustalonym (<i>steady state</i>)
Rodzaj badania	Określenie	Stopień	Metoda igły termicznej w stanie nieustalonym (<i>non-steady state</i>)					miernik przewodności termicznej Hukseflux		
			analizator właściwości termicznych KD2 Pro, Tempos		miernik przewodności termicznej TK04		sonda igłowa V/LQ			
			sonda typu TR	sonda typu RK	sondy dyskowe HLQ	sonda igłowa V/LQ				sonda stacjonarna FOX50
Terenowe (in situ)	Świeży	0	–	+	n/d	n/d	–	n/d		
	Słabo zwietrzały	1	–	+	n/d	n/d	–	n/d		
	Średnio zwietrzały	2	–	+	n/d	n/d	–	n/d		
	Silnie zwietrzały	3	+	–	n/d	n/d	+	n/d		
	Całkowicie zwietrzały	4	+	–	n/d	n/d	+	n/d		
	Grunt rezydualny	5	+	–	n/d	n/d	+	n/d		
Laboratoryjne	Świeży	0	–	+	+	–	n/d	+		
	Słabo zwietrzały	1	–	+	+	–	n/d	+		
	Średnio zwietrzały	2	–	+	+	–	n/d	+		
	Silnie zwietrzały	3	+	–	–	+	n/d	–		
	Całkowicie zwietrzały	4	+	–	–	+	n/d	–		
	Grunt rezydualny	5	+	–	–	+	n/d	–		

+ zalecana metoda; – metoda niezalecana; n/d nie dotyczy

Tabela 6. Wytyczne określania stopnia zwietrzenia masywu skalnego wg PN-EN ISO 14689:2018-05

Określenie stopnia zwietrzenia masywu skalnego zgodnie z PN-EN ISO 14689:2018-05		
Określenie	Stopień	Opis
Świeży	0	Brak widocznych oznak wietrzenia materiału skalnego, możliwe nieznaczne przebarwienia na głównych powierzchniach nieciągłości.
Słabo zwietrzały	1	Przebarwienia wskazują wietrzenie materiału skalnego i powierzchni nieciągłości.
Średnio zwietrzały	2	Mniej niż połowa materiału skalnego uległa rozkładowi lub rozpadowi. Świeża lub przebarwiona skała występuje miejscami w obrębie masywu skalnego lub wewnątrz bloków skalnych.
Silnie zwietrzały	3	Ponad połowa skały uległa rozkładowi lub rozpadowi. Fragmenty świeżej skały macierzystej nie występują w sposób ciągły.
Całkowicie zwietrzały	4	Cały materiał skalny uległ rozkładowi lub nawet uległ przemianom w grunt rezydualny. Oryginalna struktura masywu skalnego jest jednak w większości nienaruszona.
Grunt rezydualny	5	Cały materiał skalny przemienił się w grunt. Struktura materiału i struktura masywu skalnego uległy zniszczeniu. Nastąpiły znaczne zmiany objętościowe, ale grunt nie uległ znacznemu przemieszczeniu.

Do płaskiej powierzchni próbki przyłożyć sondę dyskową (planarną). W celu poprawienia kontaktu między próbką a sondą zaleca się zaaplikować na sondę cienką warstwę pasty termoprzewodzącej. Próbkę z sondą umieścić w prasie dociskowej (ryc. 18). Siła nacisku prasy na sondę nie powinna przekroczyć 10 barów.



Ryc. 18. Prasa dociskowa do pomiarów przewodności termicznej skal

Zaleca się wykonać minimum 5 pomiarów przewodności termicznej na każdej próbce skały, nie zmieniając położenia sondy. Wyniki uznaje się za prawidłowe, jeśli różnica między kolejnymi pomiarami przewodności termicznej nie przekracza 2%.

W skałach o teksturze kierunkowej i warstwowych (gnejsy, łupki krystaliczne i osadowe) należy w miarę możliwości zaplanować wykonanie serii pomiarów przewodności termicznej w kierunkach prostopadłym oraz równoległym do laminacji.

Wynik stosowany do dalszych obliczeń to średnia arytmetyczna z 5 pomiarów. Przed interpretacją wyników należy uwzględnić współczynnik kalibracji C (ASTM D5334-22).

Pomiary przewodności termicznej w stanie ustalonym (steady state)

Pomiar przewodności termicznej w stanie ustalonym wykonuje się na podstawie pomiaru gęstości strumienia ciepła przepływającego przez umieszczoną między dwoma płytami próbkę w jednym kierunku, przy zadanym przez operatora gradiencie temperatury.

Laboratoryjne badania przewodności termicznej gruntów i skał w stanie ustalonym wykonywane są z użyciem sondy stacjonarnej typu FOX (ryc. 19).

Przeznaczoną do badań próbkę skały należy przyciąć do kształtu walca. Wysokość próbki powinna wynosić maksymalnie 25 mm, a średnica mieścić się w przedziale 50–62 mm. Powierzchnie ścięcia powinny być jak najbardziej płaskie i równoległe do siebie. W celu otrzymania dokładniejszego wyniku zaleca się wypolerowanie obu powierzchni ścięcia.

W przypadku prowadzenia pomiarów metodą dwóch grubości (*two thickness method*) należy przygotować dwie próbki tej samej skały lub gruntu o dwóch różnych wysokościach, przy czym jedna próbka powinna być dwukrotnie wyższa niż druga. Powierzchnie obydwu próbek powinny być przygotowane w ten sam sposób.

Przed rozpoczęciem serii pomiarów należy wykonać pomiar testowy na materiale wzorcowym o znanej przewodności termicznej (np. Pyrex, Pryoceram), dostarczonym przez producenta aparatury. Wzorzec należy dobrać do spodziewanej przewodności termicznej badanego gruntu lub skały.

Po włożeniu próbki do aparatury należy upewnić się, że został zapewniony właściwy kontakt między próbką a obiema płytami. Dla próbek gruntów o konsystencji plastycznej oraz tych o nierównej powierzchni ścięcia można zastosować zewnętrzne termopary.

Do obliczeń wartości przewodności termicznej przyjmuje się średnią z zadanej liczby pomiarów, wykonanych po ustabilizowaniu się przepływu strumienia ciepła przez całą objętość próbki. Należy mieć na uwadze, że próbki o większej grubości oraz o dużej gęstości objętościowej mogą potrzebować więcej czasu na ustabilizowanie się temperatury.

4.3. BADANIA EFEKTYWNEJ PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ METODĄ TESTU REAKCJI TERMICZNEJ

Inną, jedną z najczęściej stosowanych metod pomiaru wartości średniej efektywnej przewodności termicznej skał, którą ustala się dla całej długości (głębokości) badanego otworu wiertniczego, jest tzw. test reakcji termicznej (TRT – ang. *Thermal Response Test*). Pomiary tego



Ryc. 19. Stacjonarna sonda FOX 50 do pomiaru przewodności termicznej w stanie ustalonym

typu wykonuje się zwykle dla dużych inwestycji w jednym, pilotażowym otworze z zainstalowanym już otworowym wymiennikiem ciepła, wybranym spośród wielu zaplanowanych do wykonania odwiertów pod instalację wymienników ciepła.

Wartość efektywnej przewodności termicznej otrzymywana w wyniku badania TRT jest bardzo wiarygodna, ponieważ oblicza się ją w rzeczywistych warunkach profilu geologicznego.

Metoda badania TRT polega na iniekcji energii cieplnej (o znanej wartości) do otworu i pomiarze na powierzchni terenu temperatury zasilania oraz powrotu czynnika dostarczającego ciepło (w urządzeniu GERT). Medium wypełniające wymiennik krąży w obiegu zamkniętym, a iniekcja ciepła w postaci podgrzewania płynu jest prowadzona przez cały czas trwania testu. Mierzona wartość przewodności termicznej jest wartością efektywną, tj. uwzględniającą cały ośrodek gruntowo-wodny, a także materiał wypełniający otwór (iniekt). Warunkiem otrzymania poprawnych wyników jest odpowiednio

długi czas przeprowadzenia testu, aby doprowadzić do zmian temperaturowych nie tylko w obrębie materiału wypełniającego otwór, ale także w otaczających skałach i gruntach. Minimalny zalecany czas trwania testu wynosi 72 godziny zgodnie z normą PN-EN ISO 17628.

W zakresie interpretacji wyników badania należy kierować się wytycznymi GeoTrainet (<https://geotraining.eu/resources/>) oraz wytycznymi projektu INTERREG GeoPLASMA CE (<https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE.html>) lub korzystać z przeznaczonych do tego celu oprogramowania, np. GertCAL.

W ramach opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej należy sprawdzić, czy na obszarze danego arkusza były prowadzone inwestycje budowlane z zastosowaniem GPC i zebrać informacje o już wykonanych badaniach TRT. Z punktu widzenia przydatności archiwalnych wyników badań TRT do sporządzania i weryfikacji map potencjału geotermii niskotemperaturowej zasadne byłoby wprowadzenie przez ustawodawcę zapisów prawnych regulujących konieczność wykonania testów reakcji termicznej (TRT) dla inwestycji z instalacjami o mocy grzewczej > 30kW. Obecnie raporty z badań TRT nie są obligatoryjne i nie są załącznikiem do powykonawczej Dokumentacji Geologicznej Innej, więc nie ma możliwości dostępu do tych danych z zasobów NAG.

W załączniku 3 przedstawiono przykład profilowania temperaturowego, krzywe badania TRT oraz przykład testu dyssypacji termicznej. Jeżeli na obszarze arkusza, dla którego sporządzamy mapę potencjału geotermii niskotemperaturowej, nie wykonywano TRT, należy zaplanować wykonanie co najmniej 2–5 testów na obszar (w rozumieniu sporządzanego modelu 3D). Najlepiej w istniejących lub nowo prowadzonych inwestycjach (z uwzględnieniem domów jednorodzinnych), po uprzednim uzyskaniu od właściciela nieruchomości dostępu do otworowego wymiennika ciepła w celu przeprowadzania badania. Badanie TRT wykonuje się również w miejscach prowadzonego monitoringu rozkładu temperatury w podłożu, czyli w tzw. termopiezometrach.

Badania TRT jako badania *in situ* są niezbędne do weryfikacji finalnych map rozkładu średniej efektywnej przewodności termicznej. Poprzez porównywanie wartości przewodności uzyskanej z modelowania z faktycznie pomierzoną wartością z TRT możliwe jest dokonanie korekty modelu parametrycznego w taki sposób, aby mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej w jak najbliższy sposób odpowiadały warunkom rzeczywistym.

4.4. TERMOPIEZOMETRY

Termin „termopiezometr” został wprowadzony do zadania w celu określenia otworu o specjalnej konstrukcji, który służy do badania temperatury górotworu wyłącznie w celach badawczych, nie jest wyposażony w pompę ciepła. Termopiezometry służą do wykonywania testów reakcji termicznej oraz monitoringu temperatury górotworu, który jest wykonywany w cyklu kwartalnym zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 4.5.

Na potrzeby realizacji niniejszego zadania, w latach 2021–2022 zaprojektowano i wykonano 5 otworów badawczo-monitoringowych (ryc. 20 i 21), o głębokości ostatecznej nieprzekraczającej 100 m p.p.t. (najczęściej wynoszącej 99,0 lub 99,5 m p.p.t.). Zostały one zlokalizowane w różnych regionach kraju w celu odzwierciedlenia zróżnicowanych warunków klimatycznych, odmiennej budowy geologicznej oraz warunków hydrogeologicznych. Są to następujące otwory:

- TP-1 Bielsko-Biała,
- TP-1 Budzów,
- TP-1 Halinów,
- TP-1 Wojcieszce,
- TP-1 Wrocław.

We wszystkich termopiezometrach wykonanych w ramach niniejszego zadania zainstalowana została pojedyncza U-rurka, nazywana również gruntową sondą ciepła, która składa się z dwóch przewodów wykonanych z polietylenu (PE) oraz łączącej je mufy zgrzewanej na gorąco bezpośrednio na miejscu wiercenia. Po uzyskaniu pomyślnych wyników testu szczelności i drożności, sonda zostaje wypełniona medium chłodniczym, tj. ok. 33 % wodnym roztworem

glikolu propylenowego, a następnie zapuszczona do otworu z bębna rozwijarki. Odcinek zakończony mufą wprowadzany jest do spągu otworu. W następnej kolejności przestrzeń pierścieniowa jest stopniowo uszczelniana termocementem na całej długości otworu, od spągu ku stropowi. Górne końcówki rur PE, zostają wyprowadzone do powierzchni gruntu i zamknięte w studziencie rewizyjnej. Obie zakończone są zaworami kulowymi, a jedna z nich ma także manometr. Ryciny 20 i 21 ilustrują odpowiednio różne etapy instalacji termopiezometrów TP-1 Wojcieszce.

Przed rozpoczęciem badania termopiezometr powinien być kompletnie wykonany, tj. przestrzeń pierścieniowa wypełniona materiałem wypełniającym, a rury OWC napełnione nośnikiem ciepła do poziomu terenu. W celu eliminacji zakłóceń i uzyskania równowagi termicznej pionowego OWC z otaczającym go gruntem i/lub skałą, powinna istnieć faza zrównoważenia lub tzw. „stójki” trwająca co najmniej od 3 do 7 dni między wykonaniem wymiennika a rozpoczęciem pomiarów.

Dla porównania, wg rekomendacji literaturowych dla głębokich otworów geotermalnych, minimalny czas „stójki”, który należy zachować od momentu wykonywania czynności technicznych w otworze (w tym związanych z jego wierceniem oraz cementacją), a realizacją pomiarów profilowania termicznego, powinien wynosić co najmniej 14 dni (Plewa, 1994).

Przeprowadzone dotychczas badania, pomiary i ich wyniki pozwalają na udoskonalenie konstrukcji termopiezometrów, których instalacja jest planowana w przyszłości. W celu umożliwienia wykonywania profilowania temperatury w termopiezometrach w trakcie wykonywania testów reakcji termicznej należy, zamiast pojedynczej U-rurki, zastosować dwie pojedyncze U-rurki, ewentualnie dwie zaślepione rurki monitoringowe. Rozwiązanie to umożliwi następujące dodatkowe badania i pomiary temperatury w otworze:

- W trakcie realizacji testu reakcji termicznej pojedyncza U-rurka będzie wykorzystana do cyrkulacji podgrzanego medium, podczas gdy:



Ryc. 20. Wiercenie termopiezometru TP-1 Wojcieszce



Ryc. 21. Przygotowanie otworowego wymiennika ciepła do zapuszczenia do otworu

- ◊ w jednej z gałęzi drugiej U-rurki, ewentualnie w jednej z zaślepionych rurek monitoringowych, zarówno podczas wygrzewania górotworu, jak i badania dyssypacji ciepła, będzie prowadzone profilowanie temperaturowe;
- ◊ w drugiej gałęzi U-rurki natomiast, ewentualnie w drugiej z zaślepionych rurek monitoringowych, będzie prowadzony, z wykorzystaniem rejestratorów automatycznych, stały pomiar temperatury na istotnych dla badań głębokościach, tj. na głębokości maksymalnej – tuż nad dnem otworu i na głębokości odpowiadającej temperaturze neutralnej/stałej, co umożliwi obliczenie gradientu i stopnia geotermicznego dla badanej lokalizacji. Możliwy jest również inny dobór głębokości pomiarów.

Zastosowanie rejestratorów zainstalowanych w otworze umożliwi pozyskanie dokładniejszych danych przy założeniu długoterminowego monitoringu temperatury górotworu oraz uproszczyć obsługę punktów sieci monitoringowej. Docelowo wskazane jest zainstalowanie rejestratorów z teletransmisją danych.

Najdokładniejsze dane dotyczące rozkładu temperatury, zarówno w przestrzeni górotworu, jak i w czasie, możliwe są do pozyskania w przypadku zastosowania tzw. rozproszonych pomiarów temperatury (DTS – ang. *dispersed temperature sensing*) z wykorzystaniem interrogatora i światłowodu. W przypadku termopiezometrów światłowód zatapia się na stałe w wypełnieniu termocementowym tworząc pętlę lub pojedynczy przewód, w odpowiedniej odległości od otworowego wymiennika ciepła. Końcówka światłowodu wyprowadzona zostaje na zewnątrz – najczęściej do pomieszczenia, w którym zainstalowane są pozostałe sterowniki systemu.

Interrogator umożliwia generację impulsu laserowego oraz jego odbiór, co w efekcie pozwala na zebranie szczegółowych danych dotyczących temperatury wzdłuż światłowodu. W przypadku zainstalowania interrogatora na stałe można w pełni zautomatyzować częstotliwość pobierania i zapisywania danych temperaturowych. Interrogator wielokanałowy jest w stanie obsłużyć więcej niż jeden termopiezometr w danej instalacji geotermalnej lub na danym terenie badań. Interrogator i światłowód mogą również stanowić mobilny zestaw badaw-

czy w przypadku zapuszczania światłowodu do otworów hydrogeologicznych.

4.5. BADANIA NATURALNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY W PŁYTKICH PARTIACH LITOSFERY *IN SITU*

Badanie warunków termicznych płytkich partii litosfery wykonuje się w celu realizacji map potencjału geotermii niskotemperaturowej oraz na potrzeby projektowania danej instalacji, a następnie monitorowania jej sprawności i oddziaływania na górotwór, w tym na wody podziemne. Wyniki umożliwiają także rozpoznanie ewentualnego wpływu antropopresji na naturalne warunki termiczne podłoża skalnego.

Badania, przeprowadzone w ramach niniejszego zadania, zakładały opracowanie metodyki pomiarów temperatury w różnego rodzaju otworach hydrogeologicznych, tj. studniach wierconych i piezometrach oraz w specjalnie do tego celu zaprojektowanych otworach monitoringowych, tzw. termopiezometrach.

Wypracowanie wspólnej metodyki pomiarów temperatury dla badanych otworów umożliwiło wykonanie pomiarów temperatury przez realizatorów zadania, pochodzących z różnych jednostek organizacyjnych PIG-PIB w różnych obszarach kraju, w sposób jednolity.

Pomimo różnic między dwoma ww. rodzajami otworów, badania opierały się na następujących założeniach:

- istnieje bezpośrednia więź pomiędzy temperaturą płynu w otworze a temperaturą otaczającego górotworu (gruntów, skał i wód podziemnych);
- temperatura płynu w otworze i temperatura górotworu pozostają w trwałej równowadze termodynamicznej (stanie stałym).

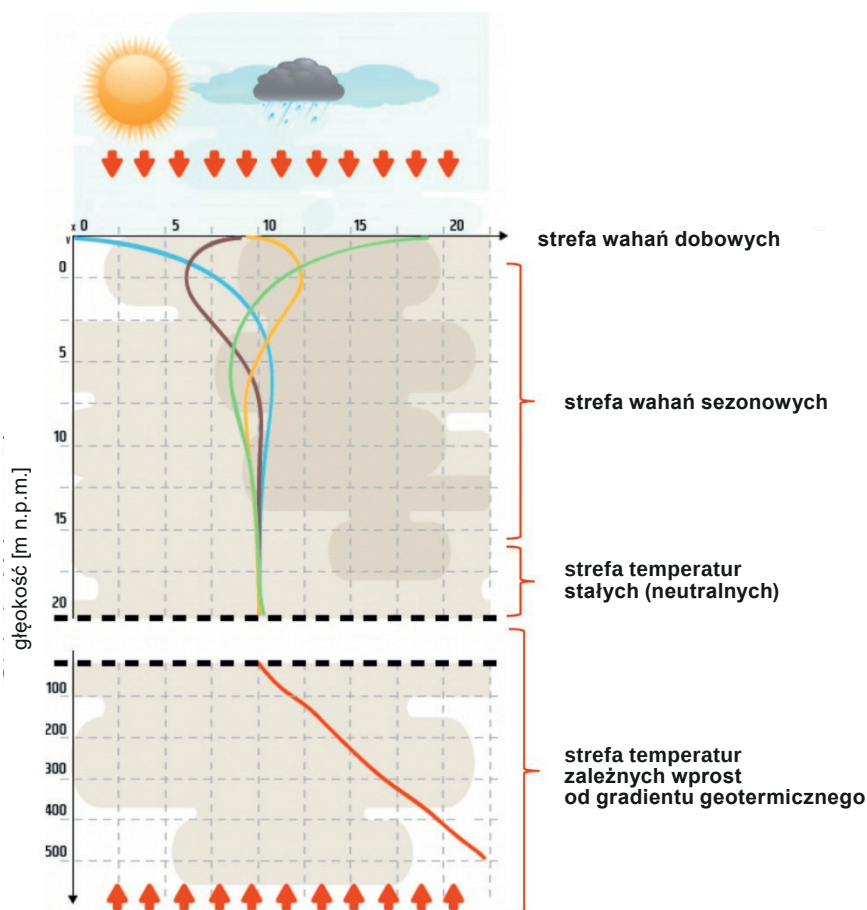
W celu spełnienia powyższych założeń pomiary temperatury wykonano w otworach o długotrwałej stojce, która w przypadku otworów hydrogeologicznych wyniosła nawet do kilkunastu lub kilkudziesięciu lat. W przypadku termopiezometrów wykonanych na potrzeby zadania w 2021 r., „stójka” była siłą rzeczy krótsza i wyniosła kilka miesięcy, jednak jak pokazały

wyniki badań, czas ten był wystarczający do osiągnięcia ustalonego stanu termodynamicznego pomiędzy górotworem i płynem w otworze.

Wykonane badania miały na celu scharakteryzowanie pionowych zmian temperatury górotworu, która w przypadku braku zaburzeń antropogenicznych cechuje się określoną strefowością (ryc. 22):

- strefa wahań dobowych – od powierzchni gruntu do głębokości kilkudziesięciu centymetrów poniżej poziomu terenu, w której temperatura górotworu zależna jest głównie od czynników zewnętrznych, takich jak temperatura powietrza atmosferycznego, nasłonecznienie, intensywność opadów atmosferycznych oraz ich temperatura itp.;
- strefa wahań sezonowych – w przedziale głębokości od kilkudziesięciu centymetrów do ok. 15–20 m p.p.t., w której zmiany temperatury spowodowane są głównie różnicami temperatury powietrza pomiędzy poszczególnymi porami roku;
- strefa przejściowa – w przedziale głębokości od ok. 20 do 60–80 m p.p.t. (w zależności od lokalnych warunków), w której możliwe są zarówno spadki, jak i przyrosty temperatur;
- strefa temperatur zależnych wprost od gradientu geotermicznego – poniżej głębokości ok. 80 m p.p.t., w której temperatura górotworu wzrasta wprost proporcjonalnie do lokalnej wartości gradientu geotermicznego.

Należy mieć na uwadze, że na przestrzeni ostatnich 2–3 dekad warunki termiczne na obszarach aglomeracji miejskich i na terenach uprzemysłowionych uległy znacznej zmianie notując stały wzrost średniej temperatury powietrza atmosferycznego i powierzchni terenu. Zjawiska te mają wpływ na rozwój miejskich wysp ciepła (MWC), co z kolei powoduje wzrost średniej temperatury płytkich partii górotworu, w tym wód podziemnych, i powstawanie obszarów odznaczających się anomalnymi wartościami temperatury. W związku z tym podwyższone wyniki oznaczeń temperatury w termopiezometrach zlokalizowanych w warstwach przypowierzchniowych w rejonach dużych miast i aglomeracji miejskich należy uznać za prawidłowe.



Ryc. 22. Poglądowy schemat rozkładu temperatur płytkiej partii górotworu. Źródło: projekt Managing Urban Shallow Geothermal Energy MUSE, projekt graficzny Monika Cyrklewicz

W celu identyfikacji występowania wyżej opisanych stref temperatury górotworu oraz przygotowania serii danych wynikowych do korelacji z profilami geologicznymi i obliczenia ich właściwości termicznych, w badanych otworach wykonano profile temperaturowe. Do realizacji profilowań temperatury w otworach, na różnych etapach zadania, zaleca się użycie poniższych rodzajów przyrządów pomiarowych:

- miernik typu 110 firmy HydroTechnik GmbH, wyposażony w termometr z czujnikiem pt100, zapuszczany do otworu na taśmie mierniczej;
- miernik WLT Meter model 201 firmy Solinst, wyposażony w termometr z czujni-

kiem pt100, zapuszczany do otworu na taśmie mierniczej;

- rejestrator Levellogger 5 LT M200, model 3001, firmy Solinst, zapuszczany do otworu na linie stalowej lub sznurku kevlarowym z podziałką;
- rejestrator Barologger 5 LT M1.5, model 3001, firmy Solinst, mierzący ciśnienie atmosferyczne i temperaturę na powierzchni terenu.

Dwa pierwsze urządzenia umożliwiły zapuszczenie sondy temperaturowej do otworu na taśmie odwijanej z bębna, odczytanie z niej bieżącej głębokości oraz wartości temperatury z umieszczonego w bębnie wyświetlacza termometru. Obie wartości były następnie wpisywa-

ne do arkusza kalkulacyjnego programu Excel. Zastosowanie termometrów na taśmie niosło za sobą konieczność wykonywania pomiarów dyskretnych, tj. pomiaru temperatury dla danej głębokości. Zwiększenie liczby punktów pomiarowych w profilu (częstości próbkowania) w celu otrzymania bardziej precyzyjnych danych skutkowało wydłużeniem czasu profilowania.

Przyjęto następujące zasady wykonywania profili temperaturowych termometrami na taśmie:

Czynności, badania i opisy do wykonania przed rozpoczęciem profilowania:

- inspekcja wizualna stanu technicznego obudowy otworu;
- opis zagospodarowania terenu w rejonie otworu;
- opis infrastruktury podziemnej, z którą sąsiaduje otwór;
- pomiar temperatury powietrza atmosferycznego przy otworze bezpośrednio nad gruntem;
- pomiar współrzędnych GPS (w przypadku nowego otworu);
- otwarcie obudowy;
- odczyt wskazania manometru;
- otwarcie obu zaworów otworowego wymiennika ciepła;
- pomiar głębokości do zwierciadła wód podziemnych lub poziomu glikolu w U-rurce przed profilowaniem;
- zapisanie dokładnego czasu rozpoczęcia profilowania.

Pomiary temperatury w otworze hydrogeologicznym/termopiezometrze:

- każdy pomiar wykonywany jest do czasu otrzymania stabilnego wyniku temperatury (za wynik stabilny uznaje się ten ze zmiennością nie przekraczającą $0,1^{\circ}\text{C}$);
- dla każdego pomiaru odczytywana jest wartość głębokości z taśmy i temperatury z wyświetlacza urządzenia;
- wyniki notowane są w zeszycie terenowym i po powrocie do biura wpisywane do programu Excel;

- w otworze lub solanki (roztworu glikolu) w U-rurce termopiezometru;
- ze względu na konieczność dostosowania temperatury termometru do tej panującej w otworze zaleca się pozostawienie sondy w punkcie pierwszego pomiaru na czas ok. 10 min., po którym można rozpocząć profilowanie;
- kolejne pomiary temperatury wykonywane są zgodnie z poniższą dyskretyzacją głębokości:
 - ◊ w przedziale głębokości 0–5 m p.p.t. – pomiary co 0,5 m, w celu wykazania wahań dobowych, sezonowych i ewentualnych anomalii związanych z infrastrukturą podziemną;
 - ◊ w przedziale głębokości 5–10 m p.p.t. – pomiary co 1 m, w celu wykazania wahań sezonowych i ewentualnych anomalii związanych z infrastrukturą podziemną;
 - ◊ w przedziale głębokości 10–20 m p.p.t. – pomiary co 2 m, w celu wykazania wahań sezonowych i ewentualnych anomalii lokalnych związanych z infrastrukturą podziemną;
 - ◊ poniżej głębokości 20 m p.p.t. – pomiary co 2 m, w celu wykazania zmian związanych z oddziaływaniem gradientu geotermicznego.

Czynności, badania i opisy do wykonania po zakończeniu profilowania:

- zapisanie dokładnego czasu zakończenia profilowania;
- pomiar poziomu glikolu w U-rurce po profilowaniu;
- zamknięcie obu zaworów U-rurki po profilowaniu;
- zamknięcie obudowy otworu.

Dokumentacja fotograficzna badań terenowych:

- 1 zdjęcie ogólne z otoczeniem i pracownikiem w trakcie pomiaru;
- 1 zdjęcie szczegółowe ilustrujące instrumenty przy otworze;

- 1 zdjęcie szczegółowe ilustrujące obudowę otworu z zewnątrz, tabliczkę znamionową, nr otworu itp.;
- 1 zdjęcie ilustrujące wnętrze otworu;
- inne zdjęcia ilustrujące np. zagospodarowanie terenu, uszkodzenia obudowy, przeszkody na wlocie do otworu itp.

Każdorazowo profilowanie temperatury w termopiezometrze musi zostać odpowiednio odnotowane i opisane w zeszycie terenowym. Wyniki pomiarów należy również zapisać w formie elektronicznej. Na potrzeby realizacji niniejszego zadania opracowany został arkusz kalkulacyjny w programie Excel umożliwiający wykreślenie termogramu (ryc. 23, 24). Ponadto plik zawiera tabelę uwzględniającą następujące dane dotyczące profilowania:

- nazwa otworu,
- układ współrzędnych,
- współrzędne X, Y [m], Z [m n.p.m.],
- data pomiaru [dd.mm.rrrr],
- czas trwania pomiaru [gg:mm:ss],
- temperatura powietrza [°C],
- poziom glikolu w U-rurce przed profilowaniem [m],
- poziom glikolu w U-rurce po profilowaniu [m],
- różnica poziomu glikolu [m],
- ciśnienie glikolu w U-rurce przed profilowaniem [bar],
- ciśnienie glikolu w U-rurce po profilowaniu [bar],
- różnica ciśnienia glikolu [bar],
- głębokość ostateczna otworu [m p.p.t.],
- urządzenie pomiarowe i nr seryjny,
- osoba (-y) wykonująca (-e) profilowanie,
- uwagi.

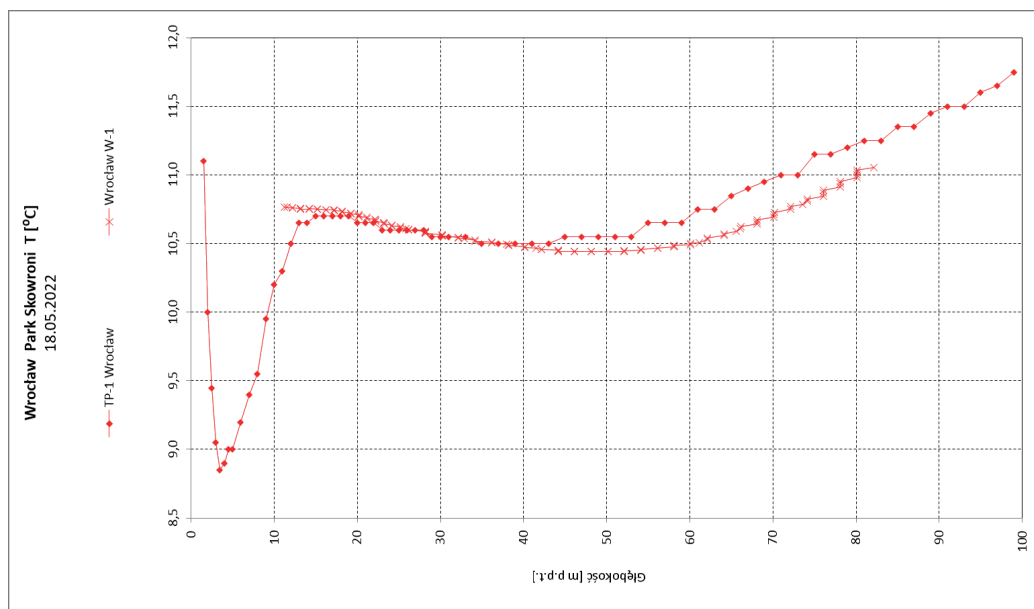
Warto zwrócić uwagę na fakt, że w ramach zmiany Prawa Geologicznego i Górniczego drogą Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie innych dokumentacji geologicznych wprowadzono obowiązkowe wykonywanie profilowania termicznego dla OWC (Dz.U. 2020 poz. 2449). W rozporządzeniu tym brakuje jednak dokładnego opisu warunków i głębokości, w jakich należy wykonać profilowanie termiczne.

Proponowana w niniejszym rozdziale metodyka pomiarów temperatury w termopiezometrach może stanowić punkt odniesienia do standaryzacji procedury profilowania termicznego OWC wykonywanego w ramach sporządzania geologicznych dokumentacji powykonawczych.

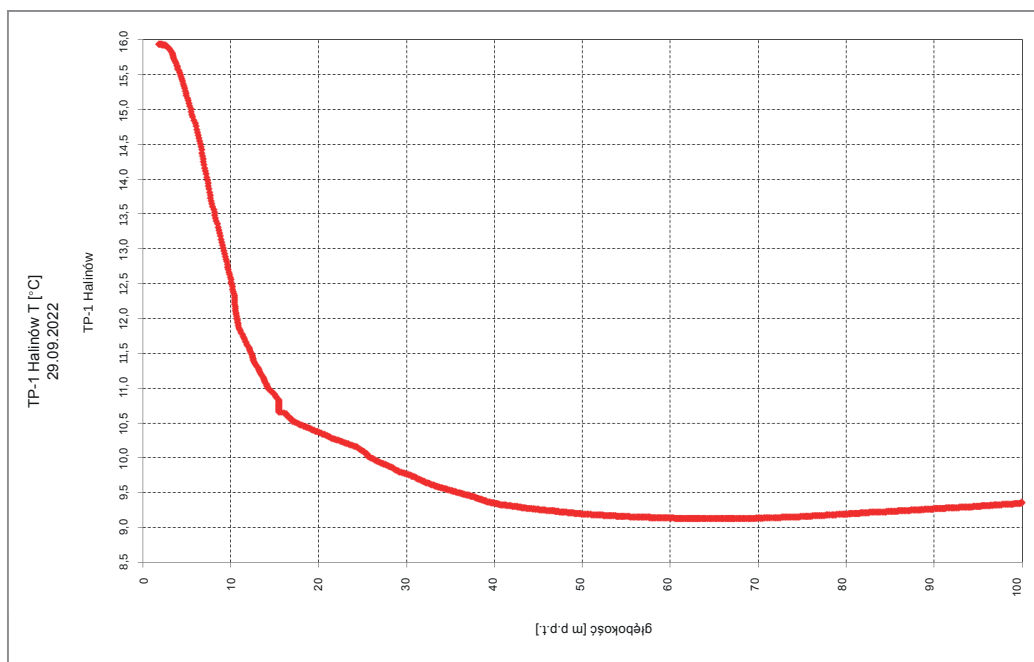
Zastosowanie rejestratorów automatycznych firmy Solinst znacznie uprościło badania, a przede wszystkim umożliwiło uzyskanie dokładniejszych danych, tj. zwiększenie rozdzielczości pomiaru i kompensację danych otworowych z wartościami ciśnienia atmosferycznego. Możliwość eksportu danych zapisanych w pamięci urządzenia do formatu Excel, bez konieczności ich ręcznego przepisywania, przyspieszyła proces otrzymania wyników z przeprowadzonych badań. Ryciny 23 i 24 przedstawiają przykładowe wyniki profilowania temperatury odpowiednio w sposób dyskretny i ciągły.

Przed wykonaniem pomiaru temperatury rejestratory były programowane z użyciem firmowego oprogramowania Levellogger w wersji 4.6.2, które umożliwia zdefiniowanie parametrów profilowania, takich jak: tytuł pliku, czas włączenia i wyłączenia rejestratora, częstotliwość próbkowania (wartość min. 1 sek.) itp. Po zakończeniu profilowania oprogramowanie umożliwia kompensację wartości ciśnienia słupa wody z ciśnieniem atmosferycznym, wygenerowanie wykresu i eksport danych wynikowych do pliku w formacie .csv, a następnie w formacie .xls. Rycina 25 ilustruje zrzut ekranu oprogramowania Levellogger ze skompensowanym wykresem wynikowym profilowania w termopiezometrze TP-1 Wrocław.

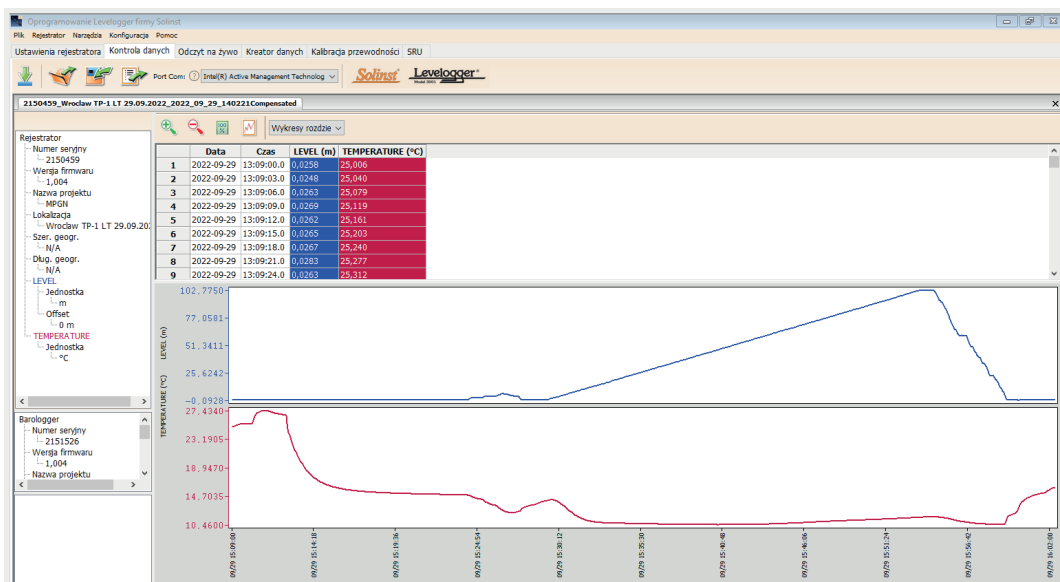
Zgodnie z zaleceniami producenta profilowanie rejestratorem Levellogger 5 LT M200 jest możliwe do głębokości 200 m ciśnienia słupa wody, jednak wytrzymałość czujnika ciśnienia jest dwukrotnie wyższa. Zanurzenie rejestratora poniżej głębokości 400 m słupa wody może spowodować nieodwracalne uszkodzenie czujnika. Profilowania rejestratorem Levellogger 5 LT M200 mogą być prowadzone zgodnie z dyskretyzacją opisaną powyżej, jednak znacznie dokładniejsze wyniki pomiarów temperatury



Ryc. 23. Wyniki profilowania temperatury w sposób dyskretny w piezometrze Wrocław W-1 i termopiezometrze TP-1 Wrocław w dniu 18.05.2022



Ryc. 24. Wyniki profilowania temperatury w sposób ciągły w termopiezometrze TP-1 Halinów (29.09.2022)



Ryc. 25. Zrzut ekranu oprogramowania Levellogger ze skompensowanym wykresem wynikowym profilowania w termopiezometrze TP-1 Wrocław

w otworze daje zastosowanie profilowania ciągłego, tj. dobranie niskiej wartości częstości próbkowania, wynoszącej np. 1–5 sek. i odpowiedniej stałej prędkości zapuszczania rejestratora do otworu, wynoszącej np. 4–5 m/min. Ryciny 26 i 27 ilustrują stanowisko pracy w trakcie profilowania temperatury w termopiezometrze TP-1 Wrocław.

4.6. BADANIA GEOFIZYCZNE

Opracowując metodykę badań geofizycznych dla niniejszego zagadnienia, dokonano podziału na obszary dla których w badaniach geofizycznych należy stosować badania geoelektryczne w wariantach VES (pionowe sondowania elektrooporowe) lub ERT (tomografia elektrooporowa). Głównym kryterium podziału było występowanie skał i zwietrzelin na niewielkich głębokościach, z powiązanymi dla tego typu budowy geologicznej strefami dyslokacyjnymi.

Podział dokonany został na podstawie opracowania Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (Majer i in., 2018), w którym

przedstawiono założenie podziału na regiony geologiczno-inżynierskie w Polsce. Regionalizacja geologiczno-inżynierska polega na identyfikacji jednostek o określonych granicach, rozprzestrzenieniu i charakterystyce. Podstawowymi jednostkami geologiczno-inżynierskimi są obszary geologiczno-inżynierskie. Wydzielono je na podstawie kryterium identyczności profili geologicznych. Jednostkami wyższego rzędu są regiony geologiczno-inżynierskie, które charakteryzują się wspólnym stylem budowy geologicznej, zaś wyższymi są nadregiony cechujące się podobnym stylem budowy geologicznej.

Kryterium to przyjęto za podstawowe w sytuacji wybierania optymalnej metodyki wykonywania prac geofizycznych. Przy każdym z regionów podano w nawiasie jaką metodą geofizyczną powinna być użyta jako podstawowa do rozpoznania budowy geologicznej. Wyodróżniono 12 regionów, które przedstawiono na rycinie 28.

1. Nadregion Niżu

a. Region złodowaceń północnopolskich fazy pomorskiej (VES);



Ryc. 26. Profilowanie temperatury w termopiezometrze TP-1 Wrocław za pomocą rejestratora Solinst zapuszczanego na sznurku kevlarowym w dniu 29.09.2022



Ryc. 27. Obudowa termopiezometru TP-1 Wrocław

- b. Region złodowaceń północnopolskich złodowacenia Wisły (VES);
- c. Region złodowaceń środkowopolskich złodowacenia Warty (VES);
- d. Region złodowaceń środkowopolskich złodowacenia Odry (VES).

2. Nadregion Wyżyn

- a. Region Wyżyny Lubelskiej (VES);
- b. Region Wyżyny Małopolskiej (VES);
- c. Region Wyżyny Śląsko-Krakowskiej (ERT).

3. Nadregion Przedgórzy

- a. Region Przedgórza Karpackiego (VES)
- b. Region Przedgórza Sudeckiego (VES)

3. Nadregion Gór

- a. Region Gór Świętokrzyskich (ERT);
- b. Region Karpat (ERT);
- c. Region Sudetów (ERT).

Szczegółowy opis każdego z regionów znajduje się w opracowaniu Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (Majer i in., 2018).

Badania geofizyczne powinny zostać zaplanowane z uwzględnieniem archiwalnych danych geofizycznych oraz otworów archiwalnych. Przy projektowaniu przebiegu badań geofizycznych w przypadku cięcia arkusowego 1:50 000 należy każdorazowo dokonywać konsultacji w zakresie geologii regionalnej. Ma to na celu optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich, czasu oraz kosztu tych badań. Pozwala to również uniknąć sytuacji, w której badania będą wnosiły mało użytecznych informacji do konstrukcji bazowego modelu geologicznego 3D.

4.6.1. Archiwalne badania geofizyczne

W Banku Danych Elektrooporowych, sporządzonym w 1996 r., zinwentaryzowano blisko 3000 pozycji opracowań wyników badań geoelektrycznych. Ich rozmieszczenie na obszarze Polski dokumentuje mapa poglądowa (ryc. 29). Ujęte w Banku opracowania obejmują pomiary wykonane głównie metodą elektrooporową oraz sondowaniami elektrooporowymi VES. Obecnie stan ten uzupełnia kilkaset opracowań tematów geoelektrycznych, zrealizowanych po 1997 r.

W latach 2007–2008 rozpoczęto prace nad stworzeniem cyfrowej wersji Banku Danych Elektrooporowych, polegające na cyfrowaniu krzywych polowych wraz z ich lokalizacją. W etapie I do bazy dodano ok 150 000 krzywych VES (ryc. 29), drugie tyle czeka na sfinansowanie (kolor zielony). Dane, które weszły w skład cyfrowego Banku Danych elektrooporowych zasiliły CBDG.

Mając na uwadze skalę projektu (geotermalnego), z perspektywą wykonania modeli przewodności termicznej dla różnych obszarów Polski, wydaje się zasadne wykorzystać tak duży zasób informacji, jaki niosą ze sobą wyniki badań geoelektrycznych. Krzywe polowe stanowią znakomity materiał do reinterpretacji danych np. pod kątem uzupełnienia modeli przewodności termicznej.

Sposób wykorzystania danych archiwalnych został opisany w metodyce badań dla VES (rozdział 4.6.3).

4.6.2. Założenia metodyczne

Model geologiczny (MG) można rozważać w uogólnieniu jako przestrzenny rozkład wyrażony poprzez funkcje.

$$MG = f(x, y, z)$$

Budowa geologiczna (model geologiczny) narzuca przestrzenny rozkład własności fizycznych – rozkład oporności $\rho(x, y, z)$.

$$MG(x, y, z) \rightarrow \rho(x, y, z)$$

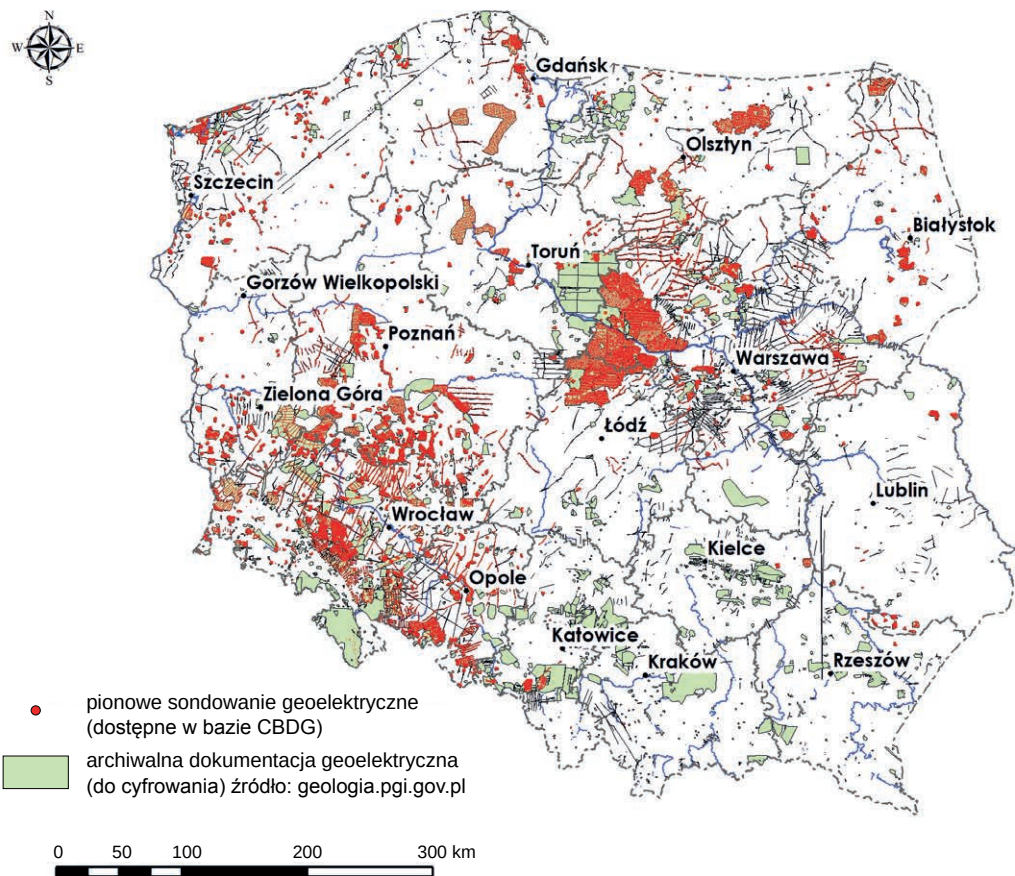
W zadaniu odwrotnym model geoelektryczny określa model geologiczny, a ten z kolei daje możliwość przyporządkowania (korelacji) wartości przewodności termicznej.

$$\rho(x, y, z) \rightarrow MG(x, y, z) \rightarrow La(x, y, z)$$

Wynikiem badań geoelektrycznych dla mierzonej przestrzeni jest model geoelektryczny. Model ten następnie przekształcamy na model



Ryc. 28. Podział na regiony geologiczno-inżynierskie (Majer i in., 2018)



Ryc. 29. Poglądowa mapa lokalizacji dokumentacji geoelektrycznych i sondowań VES na obszarze Polski dostępnych w bazie CBDG

geologiczny (poprzez korelacje wartości oporności danych wydzielen z warstwami litologicznymi), a ten w dalszej kolejności transformowany jest na model przewodności termicznej (ryc. 30; sposób konstrukcji takiego modelu opisano w rozdziale 10) W wielu przypadkach model geoelektryczny może być przekształcony w sposób bezpośredni na model przewodności termicznej. Doświadczenia, jakie uzyskano podczas realizacji niniejszego projektu, udowodniły, iż można w dość prosty sposób przeliczyć wartości oporności wyinterpretowanych na prze-

wodności termicznej. Przeliczenie to odbywa się według poniższego schematu (ryc. 31). Szczególnie dobre rezultaty otrzymuje się na obszarach 1a, 1b, 1c, 1d, 2a, 2b, 3a, 3b.

Wyinterpretowane wartości oporności elektrycznej należy skorelować z warstwami litologicznymi, a następnie przeliczyć je na klasy przewodności termicznej i odpowiadające im reprezentatywne wartości przewodności termicznej (ryc. 33, tab. 7). Głównym celem wykorzystywania badań geofizycznych jest jak najlepsze i szczegółowe rozpoznanie geologiczne w miej-

scach, gdzie występują braki w pokryciu terenu w bazie danych otworów archiwalnych. Wyniki badań geofizycznych, wstępnie interpretowane zgodnie z ryciną 32, podlegają kolejnej weryfikacji i reinterpretacji na etapie importu tych danych do oprogramowania do modelowania 3D. Ostateczna interpretacja profili sondowań VES i przekrojów tomografii elektrooporowej ERT należy do autora modelu 3D. Należy zwrócić uwagę, że przewodność termiczna zależy od wielu czynników, w tym nawodnienia skał/gruntów występujących w profilu. Przy interpretacji badań elektrooporowych i korelacji parametrów oporności elektrycznej vs. przewodności termicznej, należy szczególnie uwzględnić zawodnienie warstw. Ma to na celu uniknięcie błędnej parametryzacji termicznej SGT.

Dla obszarów fliszu karpackiego rekomenduje się stosowanie poniższej klasyfikacji do określania stosunków ilościowych skał piaszczystych i łupkowych we fliszu.

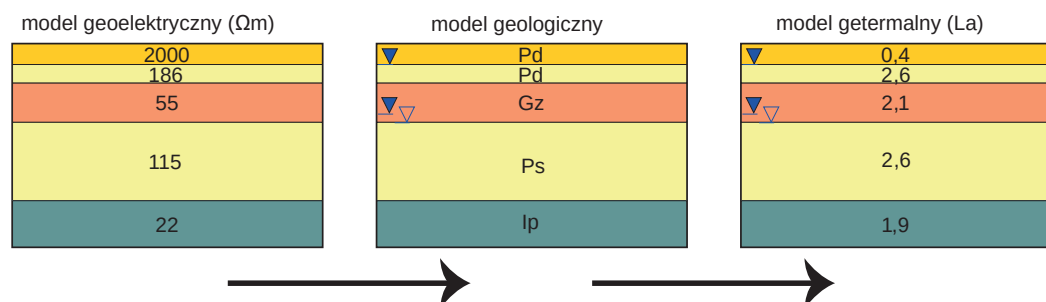
Oporność geoelektryczna fliszu, zbudowanego z naprzemianległych warstw wysokooporowych piaszczystych i niskooporowych łupków, jest zależna głównie od jego składu litologicznego. Można więc przyjąć, że oporność elektryczna ośrodka fliszowego jest funkcją jego składu procentowego. Zależność taką, przedstawiającą procentową zawartość piaszczystych w funkcji oporności elektrycznej, określono empirycznie na podstawie wieloletnich pomiarów wykonanych na obszarze Karpat (Trojan, 1975; Bestyński, 1997).

Na podstawie wymienionej zależności (ryc. 33), w objętym badaniami ośrodku wydzielone zostaną cztery kompleksy (serie) litologiczne. Jako punkt wyjścia do interpretacji wyników przyjęto przedziały procentowej zawartości piaszczystych w wydzielonych kompleksach (seriach) litologicznych wynikające z wpływu piaszczystych na właściwości geotechniczne ośrodka fliszowego (wg. Bestyńskiego i in., 1989). Zależność tę można też wykorzystać do przydzielenia właściwości termicznych warstwom ośrodka fliszowego.

Przykładowo, zgodnie z ryciną 33, wydzielono kompleksy litologiczne dla obszaru karpackiego objętego badaniami (arkusze SMGP: 1012 – Bielsko Biała, 1013 – Lachowice, 1014 – Sucha Beskidzka):

- I – seria piaszczysta (85–100% piaszczystych, 0–15% łupków) – oporność powyżej 150 Ωm ;
- II – seria piaszczysto-łupkowa (50–85% piaszczystych, 15–50% łupków) – oporności 90–150 Ωm ;
- III – seria łupkowo-piaszczysta (15–50% piaszczystych, 50–85% łupków) – oporności 40–90 Ωm ;
- IV – seria łupkowa (0–15% piaszczystych, 85–100% łupków) – oporności poniżej 40 Ωm .

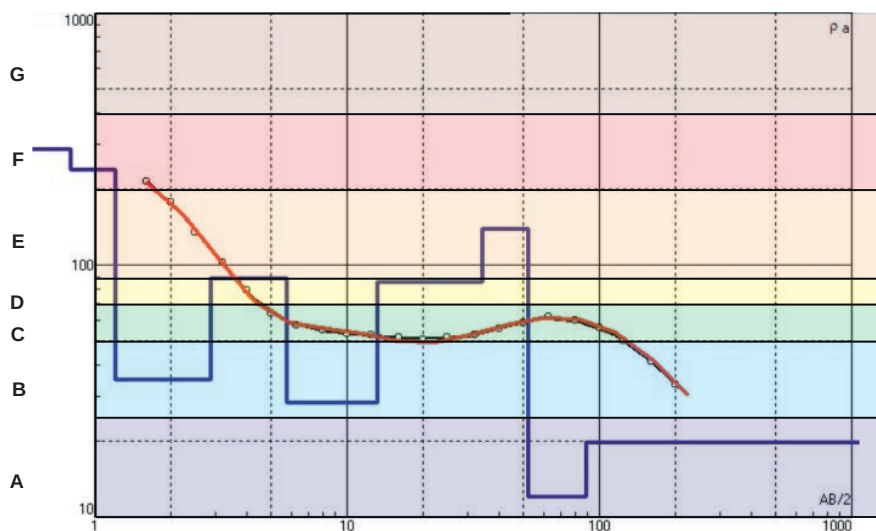
W niezaburzonym ośrodku fliszowym izolinie wartości oporności przebiegają zgodnie z granicami litologicznymi. Zaburzenie tego przebiegu związane jest najczęściej z tektoniką. Dyslokacje naruszają ciągłość warstw, a więc



Ryc. 30. Idea przejścia z modelu geoelektrycznego na model przewodności cieplnej

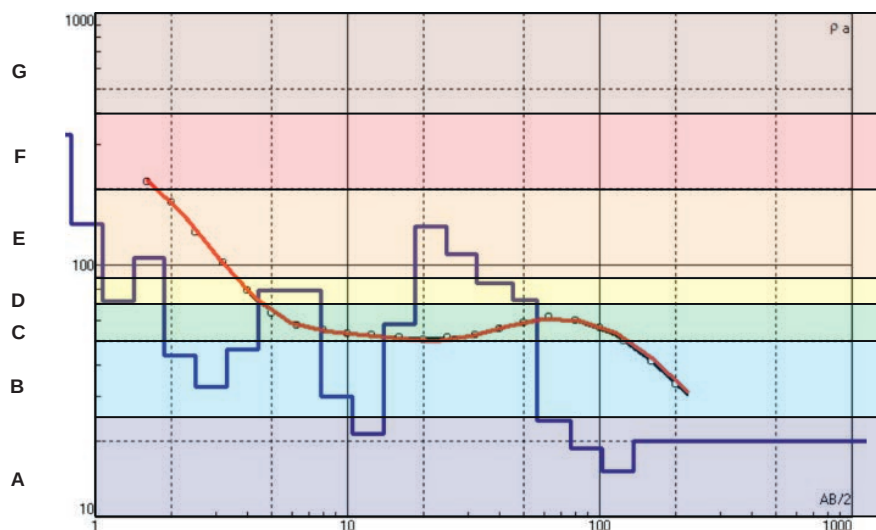
INTERPRETACJA KRZYWEJ VES – WERSJA I

METODA MANUALNA, NAJMNIEJSZA MOŻLIWA LICZBA WARSTW DLA DOPASOWANIA MODELU DO KRZYWEJ



INTERPRETACJA KRZYWEJ VES – WERSJA II

METODA PÓLAUTOMATYCZNA ZAKŁADANA DUŻA LICZBA WARSTW (20–25)

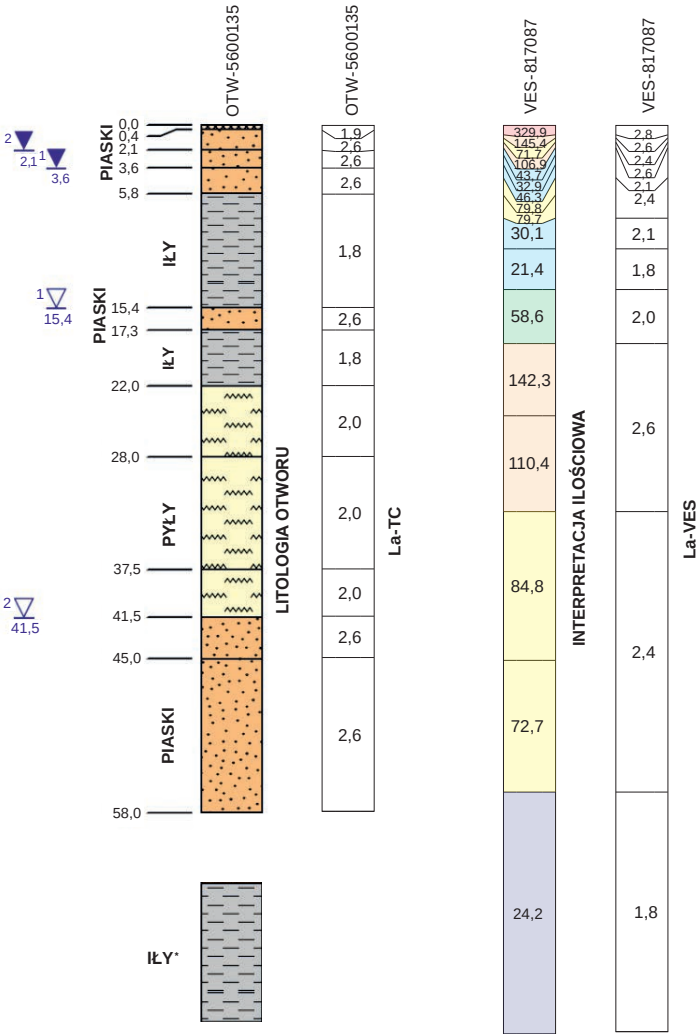


Ryc. 31. Interpretacja krzywej VES w korelacji do tabeli referencyjnej ze zdefiniowanymi wartościami przewodności termicznej

Dla porównania przedstawiono dwa warianty interpretacji: metodę manualną (wykres górny) i metodę półautomatyczną (wykres dolny). Literowe oznaczenia na osiach pionowych obu wykresów oznaczają referencyjne klasy przewodności termicznej zgodnie z tabelą 7

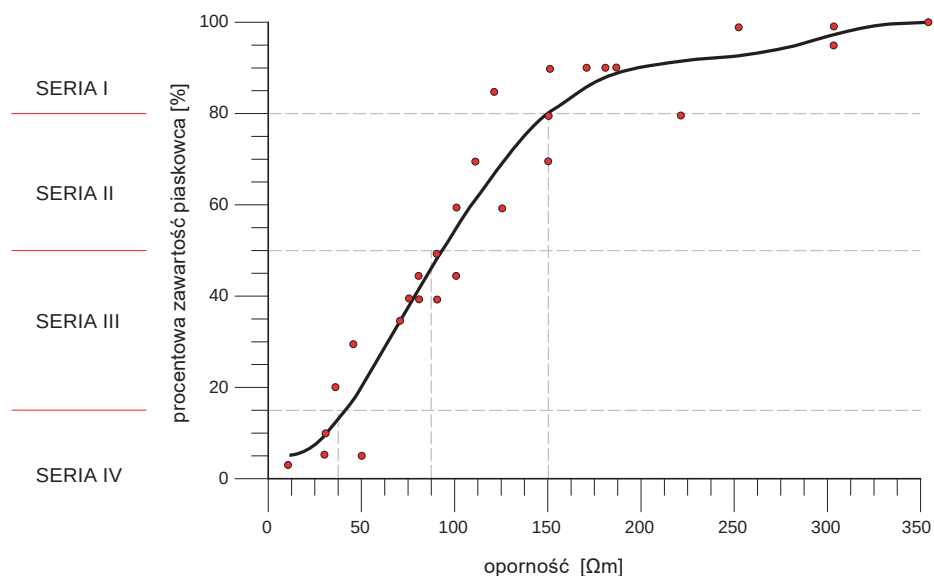
Tabela 7. Przykładowa tabela referencyjna ze zdefiniowanymi przedziałami oporności, przyporządkowanymi dla nich wydzieleniami oraz klasami przewodności cieplnej

Oporność [Ωm]	Prognozowana litologia	Klasy przewodności cieplnej	Przewodność cieplna λ [W/m*K]
<25	ił	A	1,8
25–50	glina zwięzła	B	2,1
50–70	pył	C	2,0
70–90	glina piaszczysta, piasek gliniasty	D	2,4
90–200	piasek zawodniony	E	2,6
200–400	piasek zawodniony ze żwirem	F	2,8
>400	piasek suchy	G	0,3



*INFORMACJA Z KRZYWYCH VES
A TAKŻE INNYCH OTWORÓW ARCHIWALNYCH

Ryc. 32. Przykład przeliczenia wartości przewodności cieplnej z danych litologicznych (otworu – La-TC) oraz z danych oporności (VES – La-VES)



Ryc. 33. Empiryczna zależność oporności elektrycznej fliszu od procentowej zawartości piaskowców

również ciągłość izooków odpowiadającym granicom litologicznym.

Jak widać z powyższej charakterystyki, w niektórych przypadkach zakresy oporności części gruntów czy skał będą na siebie zachodziły, może więc wystąpić problem z ich rozróżnieniem. Wydaje się jednak, iż dla znacznej części obszaru badań wartości oporności będą zdecydowanie się różnić, co da możliwość wykonania poprawnej prognozy budowy geologicznej na obszarze objętym analizą.

4.6.3. Metoda wykonania prac polowych dla sondowań geoelektrycznych (VES) i tomografii elektrooporowej (ERT)

Badania metodą geoelektryczną polegają na emisji prądu stałego (o określonym natężeniu w głąb ziemi) poprzez elektrody prądowe i pomiarze różnicy potencjałów napięcia przez elektrody pomiarowe. Dzięki możliwości rozmieszczenia w różnych schematach par elektrod wzdłuż jednej linii, uwzględniając przy tym geometrie układu pomiarowego, uzyskujemy wartość oporności elektrycznej, określanej mianem oporności pozornej. Wielkość ta w przybliżeniu odpowiada średniej wartości oporności

w półprzestrzeni badanego ośrodka do określonej głębokości. Dzięki zastosowaniu procedury inwersji, matematycznego dopasowania, możliwe jest obliczenie wartości oporności rzeczywistej dla poszczególnych warstw.

Istnieją dwie główne metody badań elektrooporowych. Są to pionowe sondowania geoelektryczne (VES) oraz tomografia elektrooporowa (ERT).

Sondowania geoelektryczne (VES)

Sondowania geoelektryczne (elektrooporowe) wykonywane są najczęściej w czteroelektrodowym układzie Schlumbergera. W czasie pomiarów wszystkie elektrody stosowanego układu – A, M, N i B – powinny znajdować się na linii prostej (ryc. 34). Pomiary polegają na stopniowym zwiększaniu rozstawów elektrod prądowych AB, co prowadzi do wzrostu głębokości penetracji ośrodka geologicznego przez prąd elektryczny i uzyskania informacji o nim z coraz większych głębokości.

Bezpośrednim efektem pomiarów geoelektrycznych są: natężenie prądu (I) w obwodzie zasilającym AB i spadek napięcia (V) w obwodzie pomiarowym MN. Uzyskane wyniki z po-

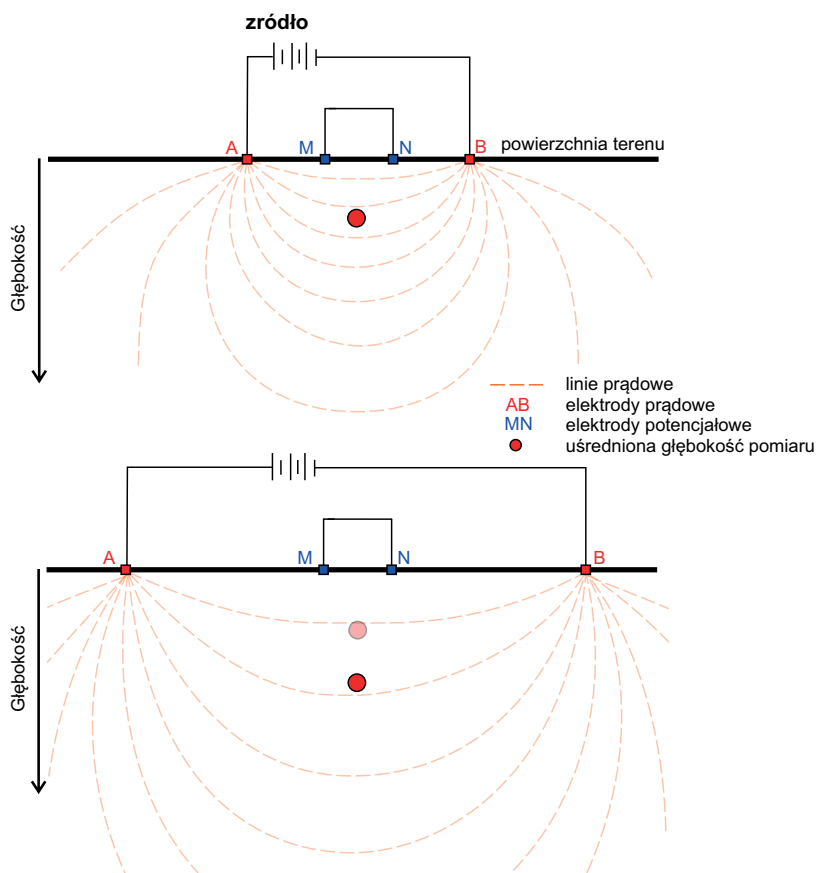
miarów terenowych, w postaci krzywych sondowań tj. wykresów zależności elektrycznych oporności pozornych od połowy zasilających $\frac{1}{2}$ AB, które warunkują penetrację głębokościową sondowania, podajemy procesowi inwersji (np. w programie IPI2win). Wyniki interpretacji ilościowej należy zaprezentować w formie modelu 1D (ośrodka poziomo warstwowanego) lub tabeli z podaniem wyinterpretowanych oporności i miąższości poszczególnych warstw.

Otrzymane wartości należy skorelować pod kątem położenia granic i doboru odpowiednich zakresów opornościowych dla wyinterpretowanych wydzielen geoelektrycznych, poprzez wykonanie dodatkowego kalibrującego sondowania

VES w miejscu szczególnie dobrze rozpoznany geologicznie np. w pobliżu otworu wiertniczego, na rozpoznanych wychodniach lub miąższych kompleksach znanych skał. Interpretacja ilościowa z uwzględnieniem danych z odwiertu umożliwia dokładne oszacowanie lokalnej relacji litologia-oporność oraz oporność–przewodność termiczna.

Tomografia elektrooporowa (ERT)

Założenia metody ERT są obszernie opisane w pracach: Keler, Frischknecht, 1966; Loke, Barker 1996; Loke, 2004; Dahlin, Zhou, 2004; Loke i in., 2007. Tomografia elektrooporowa jest bardziej rozbudowaną techniką pomiarów elek-



Ryc. 34. Uproszczony schemat pomiarowy dla metody pionowych sondowań elektrooporowych (Ostrowski i in., 2023)

AB – elektrody prądowe – to za ich pomocą „wpuszczany” jest prąd w ośrodek; MN – elektrody potencjałowe – odpowiedzialne za „odebranie” prądu z ośrodka

trooporowych w stosunku do pionowych sondowań elektrooporowych (VES). Cechuje się ona o wiele większą dokładnością i dodatkowo nie zakłada się w niej konieczności zalegania płasko-równoległych warstw różniących się opornością (ryc. 35a). W tomografii elektrooporowej uzyskujemy model 2D, zmienny zarówno w pionie jak i poziomie, który dokładniej obrazuje zmienność ośrodka geologicznego (ryc. 35b, c).

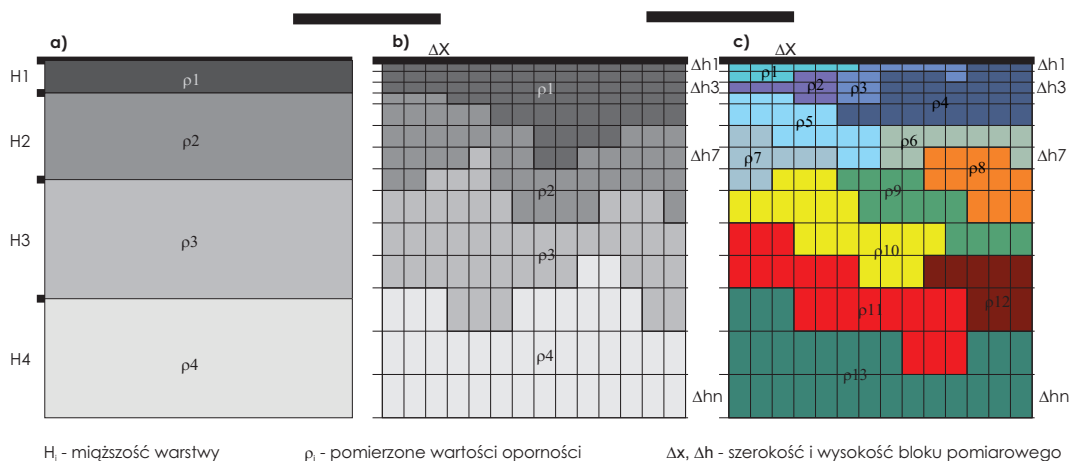
W badaniach geoelektrycznych w postaci tomografii elektrooporowej, wszystkie elektrody rozmieszcza się równomiernie wzdłuż prostej linii pomiarowej, połączonej z aparaturą pomiarową. Odległość pomiędzy poszczególnymi elektrodami jest uzależniona od zakładanego celu badawczego. Im oczekiwana dokładność jest wyższa, tym odległość między elektrodami jest mniejsza. Dla większości przypadków badania należy projektować z rozstawem elektrod nie mniejszym niż 5 m. Głębokość spodziewanej prospekcji powinna wynosić co najmniej 70–100 m p.p.t. Jest to zasięg głębokościowy wystarczający do modelowania 3D na potrzeby określania potencjału geotermii niskotemperaturowej.

Bezpośrednio przed pomiarami należy wytyczyć geodezyjnie współrzędne płaskie (np.

PUWG 1992, PUWG 2000) i wysokości (np. Kronstad 86) w obowiązującym państwowym układzie odniesienia z krokiem nie większym niż 50 m, z dokładnością w poziomie ± 30 cm oraz w pionie ± 10 cm. W celu zapewnienia jak najlepszej jakości oraz wiarygodności otrzymanych wyników badań, przed wykonaniem właściwych pomiarów należy skontrolować wartości oporów uziemień wszystkich elektrod wchodzących w skład układu pomiarowego (powinny być zgodne z zaleceniami producenta aparatury pomiarowej). W badaniach zaleca się stosować układ pomiarowy Wenner- Shlumberger, Gradient lub Dipol-Dipol.

Otrzymane dane pomiarowe należy uzupełnić o informacje dotyczące morfologii terenu (pomiary wysokości powinny pochodzić z pomiarów terenowych lub NMT), po czym poddać je procesowi interpretacji ilościowej (inwersji) zgodnie z procedurą L1-norm (robust) np. z użyciem programu Res2Dinv, Workbench ERT/IP modul. Średniokwadratowy błąd inwersji (RMS[%]) świadczący o jakości danych pomiarowych nie powinien przekroczyć 5%.

Wyniki przeprowadzonej interpretacji ilościowej należy skorelować z pobliskimi otworami o znanej litologii, w celu uzyskania charak-



Ryc. 35. Przykład różnych modeli geoelektrycznych wykorzystywanych w procesie interpretacji

terystycznego dla lokalnej budowy geologicznej modelu geoelektrycznego. Finalna interpretacja powinna obrazować litologię i elementy strukturalne badanego obszaru. Wyniki badań elektrooporowych należy zestawić w tabeli Excel lub bazie danych Access. Struktura danych powinna być kompatybilna z załącznikiem 9, który przedstawia strukturę otworowej bazy danych.

4.6.4. Metoda wykonania prac polowych przed badaniami sejsmicznymi

Badania sejsmiczne polegają na emisji w głąb podłoża fal sejsmicznych (elastycznych) i obserwacji ich rozchodzenia się w tym ośrodku w czasie. Zarówno emisję fal, jak i ich obserwacji dokonuje się zwykle z powierzchni terenu. Rozchodzenie się fal elastycznych w podłożu zachodzi w bardzo skomplikowany sposób i poszczególne techniki wykorzystują różne zjawiska falowe do rozpoznania budowy geologicznej. Technika sejsmicznej tomografii refrakcyjnej koncentruje się na obserwacji fal ugiętych, które po wygenerowaniu na powierzchni terenu migrują w głąb, uginając się na kolejnych granicach warstw o stopniowo wzrastających wartościach prędkości i powracają do powierzchni terenu, gdzie mogą być rejestrowane za pomocą układu pomiarowego. Rejestracja opóźnień pomiędzy generacją impulsu, a momentem jego dotarcia do kolejnych punktów w przestrzeni, daje możliwość wymodelowania rozkładu wartości prędkości fal sejsmicznych (pola prędkości) w ośrodku, w którym fale się rozchodzą. W wyniku badań techniką SRT powstaje zwykle przekrój pola prędkości. Szczegółowo technika SRT jest opisywana w licznych publikacjach (por. Watanabe i in., 1999; Sheehan i in., 2005).

Metody sejsmiczne są wykonywane w terenie w różny sposób. Współczesne systemy rejestracji cechują się olbrzymią elastycznością i stopniem złożoności, zarówno od strony generacji sygnału, jak i odbiorników. W przypadku wykonywania map potencjału geotermii niskotemperaturowej metody te najczęściej wy-

korzystuje się do określania miąższości stref zwietrzałych, koluwiów i osadów antropogenicznych lub do lokalizacji stref uskokowych bądź innych nieciągłości w podłożu badanych arkuszy. Wskazane jest lokalizowanie przekrojów refrakcyjnej tomografii sejsmicznej po liniach wcześniej wykonanych badań ERT. Używamy się wówczas pełny obraz rozpoznania geofizycznego podłoża.

W badaniach refrakcyjnych wspierających tworzenie map potencjału geotermii niskotemperaturowej, mających na celu rozpoznanie ośrodka podłoża do głębokości 100–200 m, uzasadnione jest wykonanie badań SRT w wersji przekrojów 2D. W badaniach takich źródło sejsmiczne i zestaw odbiorników rozmieszcza się wzdłuż linii. Należy zastosować separację między odbiornikami nie większą niż 5 m oraz gęste rozmieszczenie punktów generacji fal, preferencyjnie co 10 m. Pozwala to na wystarczająco dokładne modelowanie płytkiej strefy ośrodka. Jako zasadę opartą na doświadczeniu można przyjąć, że głębokość rozpoznania techniki SRT wynosi około 40–50% długości maksymalnego offsetu, czyli odległości pomiędzy punktem generacji fali, a najdalszym punktem odbioru. Wskazana jest generacja fal (potocznie nazywana strzelaniem) w zakresie przestrzennym pokrywającym się z aktywnymi odbiornikami, ewentualnie z kilkoma punktami poza tym zakresem. Powyższe założenia definiują wielkość układu pomiarowego – dla osiągnięcia głębokości rozpoznania rzędu 100 m konieczne jest wykorzystanie układu pomiarowego o długości 200–250 m, składającego się z 40–50 geofonów. Przy kontynuacji pomiarów na odcinku ponad tę odległość, należy stosować segmentowe przenoszenie odbiorników (tzw. roll-along) z zakładką nie mniejszą niż 30–40% geofonów.

Źródło fal sejsmicznych powinno generować energię wystarczającą do odbioru fal na odległości równej zaplanowanemu maksymalnemu offsetowi. Zwykle przy badaniach w skali opisanej powyżej wystarczającym źródłem jest uderzenie ręcznym młotem (5–10 kg) w płytkę metalową leżącą na ziemi lub proste źródło mechaniczne

oparte o przyspieszonym zrzuceniu masy. Zaangażowanie źródeł o większych energiach (materiały wybuchowe, wibratory sejsmiczne) do badań refrakcyjnych w małej skali zwykle nie powoduje podniesienia jakości zapisów uzasadniających koszty związane z ich użyciem.

Zarejestrowane dane pomiarowe zawierają przede wszystkim informacje o falach docierających do odbiorników. Na ich podstawie należy wyznaczyć precyzyjny czas opóźnienia. Wartość tę uzupełnia się o dane geometryczne – położenie punktów odbioru i strzelania w przestrzeni, dlatego w badaniach niezbędne jest dokonanie pomiarów geodezyjnych. Te wartości są podstawą do przeprowadzenia modelowania pola prędkości. Istnieje wiele różnych pakietów oprogramowania do przetwarzania danych sejsmiki refrakcyjnej. Zakres wsparcia i automatyzacji przetwarzania w różnych pakietach może się różnić. Wyniki badań sejsmicznych należy zestawić w tabeli Excel lub bazie danych Access. Struktura danych powinna być kompatybilna ze strukturą otworowej bazy danych z załącznika 9

Przekroje prędkościowe są zwykle podstawą (lub wsparciem) przeprowadzenia interpretacji geologicznej, która służy do uzupełnienia szczegółów budowy danego obszaru. Możliwe jest wykorzystanie wprost pola prędkości fal P do szacowania gęstości objętościowej warstw ośrodka według wzoru Gardnera (Gardner i in 1974), co może być pomocne przy określaniu pojemności termicznej warstw podłoża.

4.6.5. Projektowanie badań geofizycznych

Obszary 1a, 1b, 1c, 1d, 2a, 2b, 3a, 3b – badania geoelektryczne w wariacie VES

Podstawową przestrzenią, w ramach której projektuje się badania geofizyczne, jest arkusz mapy SMGP (szczegółowo opisano to w rozdziale 5.1). Dla obszaru w jego obrębie należy pozyskać archiwalne dane geofizyczne (sondowania elektrooporowe) oraz dane otworowe (z informacją dotyczącą głębokości otworów – do analizy należy wziąć pod uwagę tylko te o głębokości powyżej 20 m). Następnie należy określić lokalizację tych

danych na mapę arkusza i dokonać analizy rozkładu przestrzennego danych według poniższego schematu (ryc. 36).

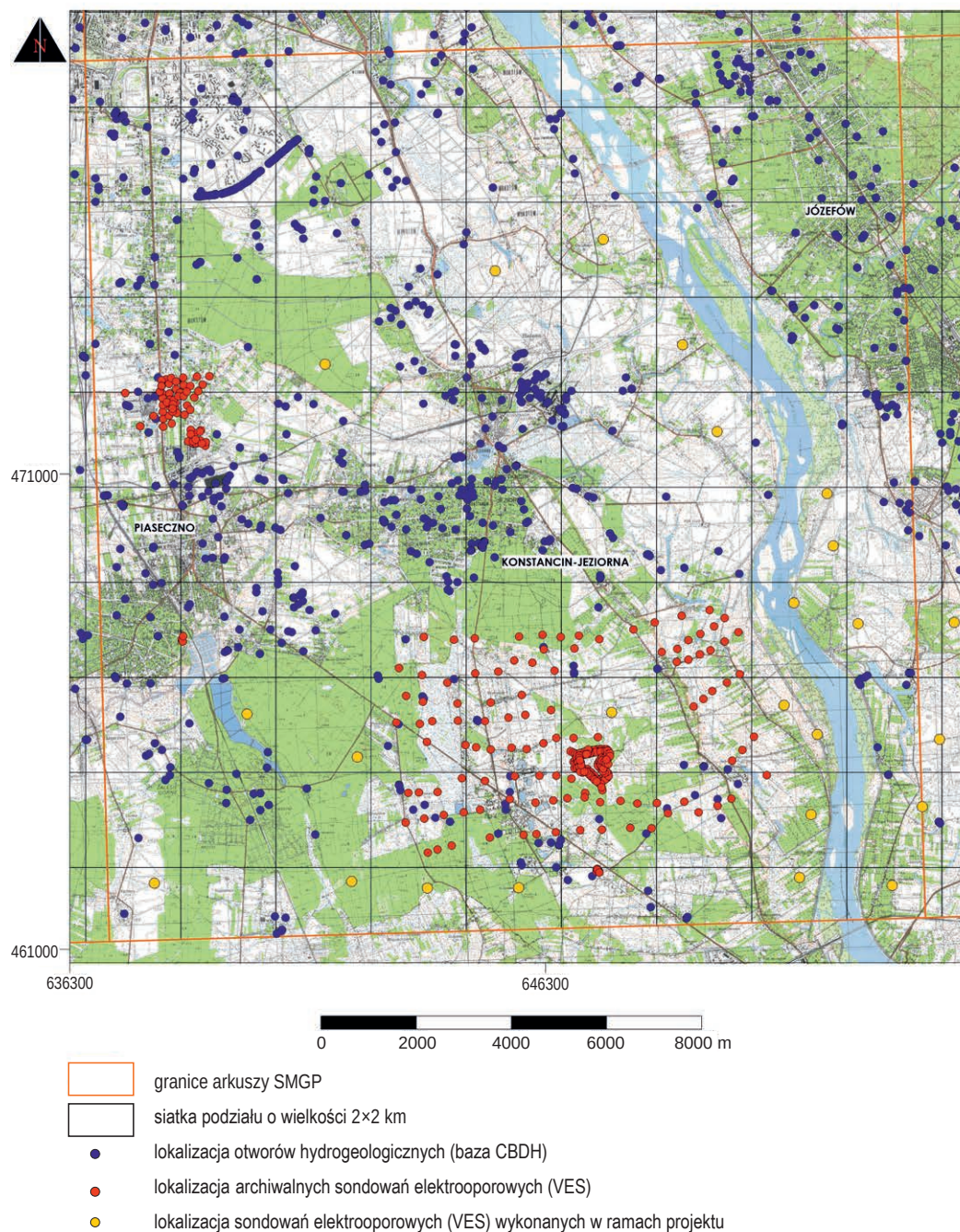
Arkusz (obszar analiz) należy podzielić na kwadraty o bokach 2×2 km (4 km^2). Dla kwadratów, w których brakuje informacji geologicznej z wierceń (otwory o głębokości większej niż 20 m) lub badań geoelektrycznych, należy zaplanować wykonanie nowych sondowań (ryc. 36 i 37) w liczbie min 1 VES na jeden wyznaczony kwadrat dla obszarów słabo udokumentowanych.

Obszary 2c, 4a, 4b, 4c – badania geoelektryczne w wariacie ERT

Bazując na doświadczeniach, jakie nabyto podczas wykonywania prac w ramach niniejszego projektu, proponuje się następujący sposób postępowania przy projektowaniu badań dla powyższych obszarów.

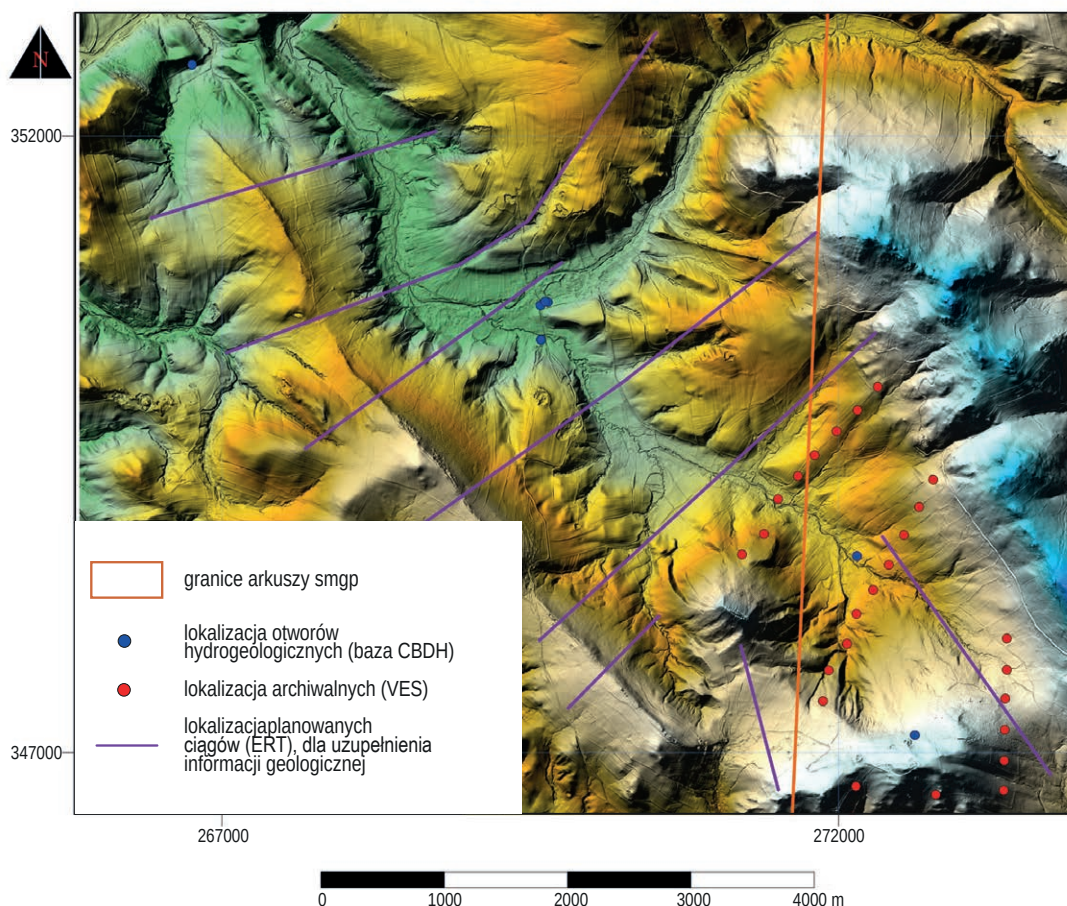
Badania geofizyczne należy zaprojektować w obrębie ograniczonego ramami wyznaczonego arkusza mapy SMGP w skali 1:50 000, według kryteriów szczegółowo przedstawionych w rozdziale 5.1. W przypadku analizowanego obszaru należy pozyskać lokalizację archiwalnych danych geofizycznych (m.in. elektrooporowych, sejsmicznych) i otworowych (z informacją dotyczącą głębokości otworów), a następnie dokonać analizy rozkładu przestrzennego danych w odniesieniu do stopnia skomplikowania budowy geologicznej w zakresie arkusza. Badania należy zaprojektować w miejscach, które z punktu widzenia poprawności modelu wymagają dodatkowego rozpoznania. Mogą być to miejsca np. stref uskoku, zwiększonej miąższości utworów czwartorzędowych, kontaktów geologicznych lub innych.

Badania należy zaprojektować w postaci ciągów ERT (lub w szczególnych przypadkach także badania sejsmiczne techniką sejsmicznej tomografii refrakcyjnej – SRT). Przewiduje się, iż w zależności od stopnia skomplikowania budowy geologicznej arkusza, liczba badań powinna łącznie wynieść od 10 do 15 km ciągów geofizycznych na arkusz. Głębokość rozpozna-



Ryc. 36. Schemat wykonany na potrzeby projektowania badań geoelektrycznych dla obszaru arkusza SMGP z uwzględnieniem danych otworowych i archiwalnych

Przykład arkusza Piaseczno, dla którego zaprojektowano i wykonano nowe badania VES w liczbie min. 1 na 4 km² dla obszarów słabo udokumentowanych)



Ryc. 37. Schemat projektowania badań dla obszaru arkusza SMGP z uwzględnieniem danych otworowych i archiwalnych danych geofizycznych

nia powinna zostać dostosowana do celu badań na danym obszarze.

Badania sejsmiczne projektuje się w przypadku, gdy w zasięgu głębokościowym planowanego rozpoznania występuje podłoże skalne. Badania sejsmiczne uzupełniają informację jakościową dotyczącą położenia stropu skał

litych oraz pozwalają na rozpoznanie występowanie nieciągłości tektonicznych – stref spękań i uskoków. Badania sejsmiczne techniką SRT pozwalają również oszacować przestrzenną zmienność gęstości objętościowej gruntów i skał – parametr wpływający na ich pojemność termiczną.

5. PRZYGOTOWANIE DANYCH WEJŚCIOWYCH I ICH PRZETWARZANIE W ŚRODOWISKU GIS

5.1. DEFINICJA OBSZARU ROBOCZEGO I PRZESTRZENI ROBOCZEJ

Dla opracowywanego arkusza mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej z wykorzystaniem modelu bazowego i parametrycznego ustanawia się obszar roboczy wyznaczony ramami odpowiedniego arkusza SMGP w skali 1: 50 000, który opcjonalnie może być powiększony o strefę buforową szerokości 500–2000 m. Strefę tę ustanawia się w celu uwzględnienia w bazie danych otworowych, na przekrojach geologicznych i w modelu 3D, dodatkowych, istotnych w rozpoznaniu budowy geologicznej regionu, otworów wiertniczych znajdujących się na sąsiednich arkuszach. Działanie to pozwoli na uzyskanie bardziej poprawnych wyników modelowania 3D wzdłuż granic arkusza, lepszego odwzorowania morfologii powierzchni serii geologiczno-termalnych (SGT) oraz późniejszych, dokładniejszych obliczeń wartości przewodności termicznej dla skał podłoża.

Obszar roboczy i przestrzeń roboczą modelu 3D tworzy się na podstawie następującej specyfikacji:

- układ współrzędnych PL 1992 (PUWG-1992);
- system odniesienia wysokości Kronsztadt 86;
- zasięg pionowy modelu: $250 \div 500$ m p.p.t.;
- górna granica modelu 3D: numeryczny model terenu (NMT);
- dolna granica modelu 3D: wygenerowana i ewentualnie wygładzona/uśredniona powierzchnia spągowa modelu (jako pochodna NMT);
- boczna granica modelu 3D: wyznaczona granicami obszaru roboczego (wraz ze strefą buforową) oraz zasięgiem pionowym modelu.

W celu przyspieszenia prac nad opracowaniem map potencjału geotermii niskotemperaturowej w skali kraju dopuszcza się jednocześnie wykonywanie prac dla grup arkuszy położonych liniowo lub formujących prostokąty.

5.2. GÓRNA GRANICA MODELU 3D: NUMERYCZNY MODEL TERENU

Numeryczny model terenu (NMT lub ang. Digital Elevation Model – DEM) przedstawia trójwymiarowe, wysokościowe odwzorowanie powierzchni Ziemi. W tworzonym modelu 3D jest on najwyżej położonym obiektem i jednocześnie stanowi górną granicę wszystkich serii geologiczno-termalnych. NMT może być przedstawiony w formie danych rastrowych lub wektorowych.

Cyfrowe modele wysokościowe są dostępne w różnych rozdzielczościach (1 m, 5 m, 10 m, 30 m, 50 m i większych wartości). W celu wykonania modelu 3D i map potencjału geotermii niskotemperaturowej zaleca się zastosowanie NMT o rozdzielczości ok. 1–25 m. Rozdzielczość nie może być mniejsza niż 25×25 m, czyli rozdzielczość siatki bazowej *mastergrid*. Należy mieć na uwadze, że NMT o wysokiej rozdzielczości wymaga większej mocy obliczeniowej i zawiera więcej antropogenicznych obiektów inżynierskich (takich jak nasypy, zapory, wiadukty itp.), które wymagają odpowiedniej korekty w przypadku gdy np. otwór został odwiercony w danym miejscu ale przed powstaniem tego typu obiektu.

5.3. DOLNA GRANICA MODELU 3D: MINIMALNA OBWIEDNIA TOPOGRAFICZNA

W przypadku zbyt dużej zmienności głębokości modelowania w regionach odznaczających się znacznymi różnicami rzeźby terenu, aby uzyskać gładką, dolną granicę modelu, do określenia jej powierzchni można użyć funkcji definiującej minimalną obwiednię topograficzną. W ArcGIS (Spatial Analyst) można wykonać narzędzie Focal Statistics wykonujące operacje morfologiczne i z jego pomocą stworzyć raster wyjściowy, gdzie wartość każdej komórki wyjściowej jest funkcją wartości wszyst-

kich komórek wejściowych, które znajdują się w jej sąsiedztwie.

Alternatywny sposób uzyskania dolnej granicy modelu polega na tym, że wysokościowy model terenu jest przekształcony do rozdzielczości $1\,000 \times 1\,000$ m, a następnie tak wykreowana, uśredniona powierzchnia zostaje obniżona o stałą głębokość 250–300 m p.p.t. Przed wczytaniem tej powierzchni do programu do modelowania 3D (GoCAD, Petrel lub GeoScene3D) należy przekonwertować ją do zestawu punktów i zapisać jako zbiór (plik) typu shape.

Dolną granicę modelu należy przyjąć na poziomie do głębokości 250–300 m p.p.t. Jest to spowodowane faktem, że obliczenia potencjału geotermii niskotemperaturowej są prowadzone dla 4 przedziałów głębokościowych: 0–40, 0–70, 0–100 i 0–130 m. Przyjęta wartość dolnej granicy modelu pozwala uniknąć nakładania się dolnej granicy maksymalnego przedziału głębokościowego (130 m) i dolnej granicy modelu, a co za tym idzie niekorzystnego wpływu warunków brzegowych modelu 3D na wyniki obliczeń potencjału (średniej efektywnej przewodności termicznej).

5.4. LEGENDA ZBIORCZA, USTALENIE SERII GEOLOGICZNO-TERMALNYCH (SGT)

Po wstępnej inwentaryzacji danych archiwalnych należy zebrać i usystematyzować istotne informacje geologiczne, hydrogeologiczne oraz geotermiczne dla badanego obszaru w formie tzw. legendy zbiorczej (przykład załącznik 4) o charakterze rozbudowanej tabeli. Legenda ta powinna zawierać skorelowane wszystkie główne i podrzędne jednostki litostratygraficzne wraz z opisem tworzących je wydzieleni skalnych, istniejące na obszarze projektu. Podstawą do wydzielenia jednostek lito-stratygraficznych są mapy SMGP, MHP w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, mapy geologiczne w większej skali (1:25 000, 1:10 000) wraz z objaśnieniami, inne kartograficzne opracowania specjalistyczne oraz profile otworów wiertniczych (załącznik 4). Należy zwrócić uwagę na obecność charakterystycznych warstw skalnych oraz/lub horyzontów

przewodnych, o wyróżniających je własnościach hydrogeologicznych i geotermicznych, które można zidentyfikować na mapach oraz w wielu otworach wiertniczych do dolnej granicy przestrzeni roboczej, czyli głębokości ok. 250–500 m p.p.t. Po dokonaniu takiej analizy wszystkie wydzielenia litologiczne badanego obszaru powinny być ujęte w legendzie jako serie geologiczno-termalne (SGT). Wyróżnienie tego typu serii następuje według kryteriów chronologiczno-stratygraficznych, hydrogeologicznych oraz własności termicznych skał odpowiednio do zakładanego stopnia dokładności modelu. Należy przy tym wziąć pod uwagę istotne cechy wydzieleni geologicznych, takie jak ich: geneza, struktura, petrografia czy przynależność facjalna. W przypadku łączenia serii geologiczno-termalnych należy pamiętać, aby nie dochodziło do niespójności na granicach opracowywanego arkusza (np. na krawędziach łączonych przyszłych seryjnych arkuszy map geologicznych).

Jeżeli stan wiedzy dotyczący danych serii geologiczno-termalnych jest niewystarczający, a ich odwzorowanie kartograficzne nie jest możliwe ze względu na niewielką skalę zmienności lub zbyt małą miąższość, należy takie serie odpowiednio połączyć w większe, rozpoznawalne wydzielenia. Operacja ta może okazać się potrzebna także w przypadku niedokładnej lub słabej jakości opisów stratygraficznych i litologicznych przedstawionych w profilach otworów wiertniczych. Uwaga ta dotyczy szczególnie licznych profili wiertniczych z niedokładnym, trudnym do stratygraficznej klasyfikacji opisem utworów czwartorzędowych. Końcowym wynikiem korelacji jest kolumna w tabeli legendy zbiorczej z zestawem wyróżnionych serii geologiczno-termalnych, która będzie podstawą nowo tworzonego profilu syntetycznego.

Legenda zbiorcza powinna zawierać także dodatkowe, przydatne informacje dotyczące poszczególnych SGT (o ile są dostępne) np. porowatości, wartości przewodności hydraulicznej lub termicznej dla budujących je podrzędnych wydzieleni litologiczno-petrograficznych (np. glin, piaskowców, bazaltów itp.) czy stosunki ilościowe piaskowiec/łupek dla skał fliszowych.

Wyróżnienie określonej serii geologiczno-termalnej, oprócz dostępności i jakości danych, podlega subiektywnej ocenie wykonawców modelu 3D, niemniej można w tej kwestii wyróżnić kilka kryteriów:

- **Kryterium ważności**

Jest to kryterium o najwyższym prioryecie. Jeśli dany typ/formacja litologiczna ma określone właściwości determinujące cały system, należy ją wyróżnić w zbiorczej legendzie i wzorcowym profilu geologicznym, a następnie włączyć do modelu 3D. Może to być np. wysoka przepuszczalność hydrauliczna cienkiej ławicy piaskowców jako przewodniej warstwy wodonośnej lub duża wartość przewodności termicznej pokładu/wysadu skał solnych.

- **Kryterium powierzchniowe**

Rozdzielczość modelu jest określona rozmiarem komórek rastrowych modelu wyjściowego. Obiekty mniejsze niż wcześniej zdefiniowana liczba komórek nie mogą być modelowane.

Należy podjąć decyzję, jaka jest minimalna liczba komórek rastrowych, która może należeć do jednej jednostki geologicznej. Nawiązując do wytycznych projektu TransGeoTherm, minimalną powierzchnię modelowanych jednostek ustalono na 10 000 m² (= 1 ha). Wielkość ta odpowiada 16 komórkom rastrowym przy zastosowanym rastrze siatki bazowej *mastergrid* 25 × 25 m.

- **Kryterium grubości/mięższości**

Zasadniczo w regionalnych modelach 3D zaleca się przyjęcie minimalnej modelowanej grubości/mięższości jednostek równą 2 m. Może ona być mniejsza tylko dla jednostek bardzo znaczących pod względem ich właściwości termicznych.

- **Kryterium dostępności danych potrzebnych do stworzenia modelu 3D**

Przedmiotem modelowania jest nie tylko geometria obiektów, ale także ich wzajemne kontakty. Potrzebne są co najmniej 3 punkty danych do modelowania 3D warstwy skał osadowych o stałej grubości i kącie upadu. Jednak w rzeczywistości geologicznej parametry te są przestrzennie bardzo zróżnicowane, dlatego do poprawnego odwzorowania jednostek należy

użyć jak największej ilości danych. W przypadku skomplikowanych struktur, takich jak diapir solny, potrzebne są co najmniej dwa przecinające się przekroje geologiczne, profilowania sejsmiczne lub inne. W przypadku małych obiektów, takich jak soczewki lub intruzje o nieregularnej geometrii i kontaktach ze skałami otoczenia, należy sprawdzić ile jest dostępnych danych i czy w ogóle można odtworzyć ich geometrię w formacie 3D.

Jeśli dany obiekt geologiczny (formacja, warstwa, pokład, intruzja) nie posiada wystarczającej ilości danych, aby odtworzyć jego trójwymiarowy kształt, obiekt ten należy włączyć do innej sąsiadującej jednostki. Należy przy tym uważać, aby podczas łączenia jednostek skalnych nie dochodziło do niespójności np. na styku granic map geologicznych.

5.5. LITOLOGICZNY PROFIL SYNTETYCZNY

Z wykorzystaniem wcześniej opisanej legendy zbiorczej tworzony jest w formie tabelarycznej tzw. litologiczny profil syntetyczny. Profil ten zawiera końcową listę wszystkich serii geologiczno-termalnych obecnych na danym obszarze. Dla każdego badanego obszaru (pojedynczego arkusza bądź grupy arkuszy w skali 1:50 000 lub 1:10 000 tworzących jeden model 3D) opracowuje się oddzielny profil syntetyczny. Wyróżnione SGT muszą być uporządkowane chronostratygraficznie – od najmłodszych do najstarszych – począwszy od powierzchni terenu, do głębokości 250–500 m p.p.t., czyli dolnego zasięgu przestrzeni roboczej modelu 3D. Jest to teoretyczny schemat klasyfikacji, który umożliwia połączenie warstw skalnych o podobnych właściwościach litologicznych, geotermalnych i hydrogeologicznych w jedną serię geologiczno-termalną. Standardowy profil syntetyczny zawiera numery serii geologiczno-termalnych oraz informacje o ich petrologii. Stanowi podstawę przypisania (zaseriowania) każdej warstwy skalnej opisanej w otworze do jednej wybranej SGT, wykreślenia w środowisku GIS zasięgu powierzchniowego serii oraz

wymodelowania w środowisku 3D spągu każdego obiektu wchodzącego w skład serii.

Tabela profilu wzorcowego (syntetycznego) (przykład – załącznik 5), oprócz numeru i nazwy serii geologiczno-termalnej (SGT), może zawierać następujące informacje (tytuły kolumn):

- kod stratygraficzny serii geologiczno-termalnej;
- opis litologiczny;
- identyfikatory wydzielen zastosowane na oryginalnej, cyfrowej mapie geologicznej;
- symbol literowy jednostki chronostratygraficznej;
- ujednolicony opis tekstowy SGT (na podstawie litologii skorelowanych wydzielen skalnych w legendzie zbiorczej);
- opcjonalnie: oznaczenie kolorystyczne (jako wypełnienie komórki tabeli) określonych cech skał, np. luźnych skał klastycznych, warstwy wodonośnej lub warstwy wodonośnej o małej wydajności.

Numer serii geologiczno-termicznej można nadawać zgodnie z kolejnością chronostratygraficzną, jako liczba porządkowa, przy czym zaleca się rozpoczynanie numeracji od numeru 01, 02 i kolejne. Opis serii geologiczno-termicznej powinien oddawać zróżnicowanie litologiczne utworów wchodzących w jej skład. Kod stratygraficzny dla wydzielen litologicznych zwany STRAKOD można nadać zgodnie ze schematem używanym w bazach CBDG i BDGI (tab. 8).

5.6. KODOWANIE PROFILI OTWORÓW WIERTNICZYCH I PRZEKROJÓW GEOLOGICZNYCH WG SERII GEOLOGICZNO-TERMALNYCH

Na potrzeby modelowania 3D wszystkie profile otworów wiertniczych zgromadzone w bazie danych otworowych należy odpowiednio zinterpretować i przypisać ich przynależność do odpowiedniej serii geologiczno-termicznej (SGT) w oparciu o ustalony dla każdego obszaru profil syntetyczny. W dalszej części Instrukcji, jako określenie tej czynności, używany będzie termin „seriowanie”. Kodowanie należy przeprowadzić dla każdej pojedynczej warstwy opisanej w pro-

filu otworu. Jeżeli w oryginalnym profilu otworu wydzielenia skalne nie są wystarczająco zróżnicowane pod względem opisu, muszą one być podzielone na odpowiednie serie geologiczno-termiczne, w nawiązaniu do bardziej szczegółowych danych z sąsiednich otworów. Przykładowy fragment takiej bazy z przypisanymi kodami dla SGT przedstawiają załącznik 6 oraz rycina 38. Poniższa rycina przedstawia także dalsze etapy prac, związane z przypisywaniem do każdej warstwy w otworze odpowiednich kodów pozwalających w efekcie przyporządkować wartości przewodności termicznej i obliczyć efektywną przewodność termiczną (jest to średnia ważona przewodność termiczna λ po miąższości wydzielen litologicznych w zadanym interwale obliczeniowym) do danej serii. Zagadnienie to zostało szerzej opisane w rozdziale 10.

Podczas przypisywania odpowiednich wartości SGT do każdej warstwy, należy pamiętać o kilku zasadach niezbędnych do prawidłowego wykonania modelu 3D wyznaczonych jednostek. Serie SGT muszą zachować w otworze kolejność stratygraficzną, miąższość każdej serii powinna być większa niż 2 m (w przypadku modelowania mniejszych miąższości mogą pojawić się trudności techniczne i w konsekwencji nieprawidłowości w modelowaniu obiektów 3D). Warstwy o miąższości mniejszej niż 2 m powinny być włączane do serii powyżej lub poniżej w zależności od warunków geologicznych. Ograniczenie w seriowaniu warstwy o miąższości mniejszej niż 2 m nie dotyczy ostatniej warstwy w otworze, która nie została przewiercona. W tabeli danych otworowych należy także podać przeliczoną zgodnie z numerycznym modelem terenu (w rozdzielczości zgodnej z siatką bazową mastergrid 25×25 m) rzędną nad poziomem morza (m n.p.m.). Po zakodowaniu otworów i eksporcie pliku do prac nad modelem 3D należy pamiętać, żeby podawać miąższości dla całej serii geologiczno-termicznej a nie dla pojedynczych warstw, należy więc dla każdego otworu zebrać dane o SGT.

W miarę postępu prac nad seriowaniem profili otworów wiertniczych, serie geologiczno-termiczne, mogą być na bieżąco korygowane

Tabela 8. Zestawienie kodów stratygraficznych zgodnych z CBDG i BDGI

Strakod	Skrót	Nazwa	Strakod	Skrót	Nazwa
100000	Kz	kenozoik	231000	T3	trias górny
110000	Q	czwartorzęd	232000	T2	trias środkowy
111000	Qh	holocen	233000	T1	trias dolny
112000	Qp	plejstocen	300000	Pz	paleozoik
121000	Ng	neogen	310000	P	perm
121100	Pl	pliocen	311000	P3	perm górny
121200	MPl	mio–pliocen	312000	P1	perm dolny
121300	M	miocen	320000	C	karbon
121400	OlM	oligocen–miocen	321000	C3	karbon górny (silez)
120000	PgNg	paleogen–neogen	322000	C1	karbon dolny (dinant)
122000	Pg	paleogen	330000	D	dewon
122100	Ol	oligocen	331000	D3	dewon górny
122200	Eo	eocen	332000	D2	dewon środkowy
122300	Pc	paleocen	333000	D1	dewon dolny
122399	CrPg	kreda–paleogen	340000	S	sylur
200000	Mz	mezozoik	350000	O	ordowik
210000	Cr	kreda	360000	Cm	kambr
211000	Cr3	kreda górna	361000	Cm3	kambr górny
212000	Cr1	kreda dolna	362000	Cm2	kambr środkowy
219000	JCr	jura–kreda	363000	Cm1	kambr dolny
220000	J	jura	400000	pCm	prekambr
221000	J3	jura górna	410000	Pt	proterozoik
222000	J2	jura środkowa	411000	Pt3	neoproterozoik
223000	J1	jura dolna	412000	Pt2	mezoproterozoik
229000	TJ	trias–jura	413000	Pt1	paleoproterozoik
230000	T	trias	420000	Ar	archaik

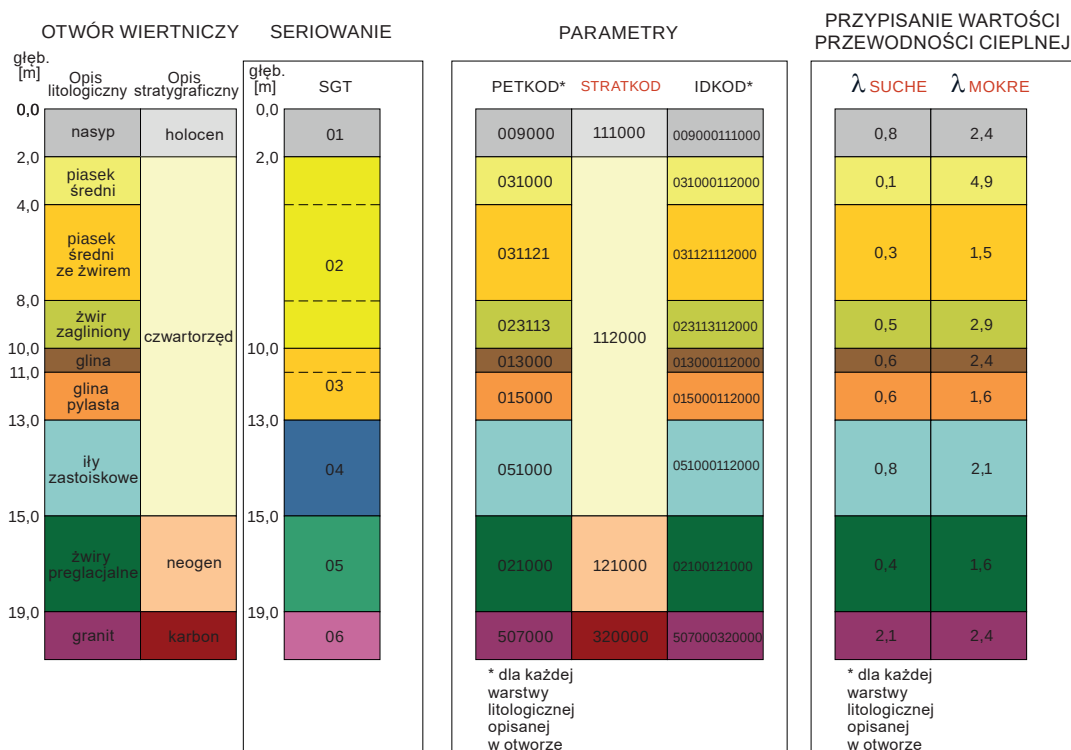
i przekształcane (niekiedy grupowane lub rozdzielane) w nowe jednostki i kodowane ponownie. Tak ustalony schemat jednostek stanowi podstawę do seriowania przekrojów geologicznych, opracowania geologicznego modelu strukturalnego i rozpoczęcia modelowania 3D.

Przekroje geologiczne stanowią interpretację danych geologicznych w formie pionowego modelu budowy geologicznej wzdłuż wybranej linii. Istniejące przekroje geologiczne przedstawiane na różnych mapach geologicznych przed włączeniem ich do modelu 3D muszą być odpo-

wiednio zreinterpretowane i przerysowane tak, aby były spójne z seriami wyróżnionymi w profilu syntetycznym.

Przekroje geologiczne stanowią przydatne narzędzia do interpretacji surowych danych geologicznych, zwłaszcza danych otworowych. Pomagają m.in. w tworzeniu i sprawdzaniu poprawności przyporządkowania do serii geologiczno-termalnych warstw skalnych opisanych w kartach otworów wiertniczych.

Dla obszaru jednego arkusza mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej w skali



Ryc. 38. Przypisanie serii SGT w otworach oraz dalsza parametryzacja warstw litologicznych

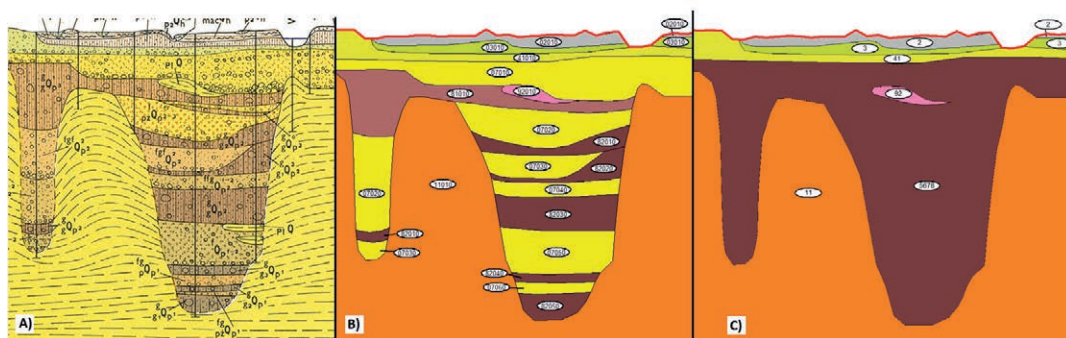
1:50 000 i modelu 3D zaleca się sporządzenie co najmniej 3 przekrojów geologicznych. Przekroje powinny być narysowane prostopadłe do biegu jednostek geologicznych, ponieważ wówczas widoczny upad warstw jest zbliżony z ich upadem rzeczywistym. Przekroje nowo wykreowane lub reinterpretowane z istniejących map SMGP muszą przebiegać przez uprzednio zakodowane otwory wiertnicze. Pokazują one przestrzenne warunki warstwowego układu serii geologiczno-termalnych i umożliwiają wczesne rozpoznanie obszarów problemowych. Układ przekrojów powinien być tak dobrany, aby ujmować wszystkie istotne dla modelowania serie i sięgać (a najlepiej przekraczać) dolną granicę przestrzeni roboczej modelu 3D. Przewyższenie pionowe powinno być dostosowane do danego reliefu terenu i istniejących miąższości serii, przy zachowaniu skali poziomej rozdzielczości docelowej.

Przekroje zaleca się opracowywać graficznie przy pomocy odpowiedniego oprogramowania

(np. CorelDraw, Geostar) pozwalającego na wpisanie kodów oraz zastosowanie znaków litologiczno-petrograficznych (szrafur) dla SGT lub ważniejszych odmian skalnych (ryc. 39).

5.7. KONTROLA POPRAWNOŚCI DANYCH OTWORÓW WIERTNICZYCH

Weryfikacja jakości i aktualności cyfrowych danych dla otworów wiertniczych jest procesem ciągłym, wykonywanym zarówno podczas wstępnego przygotowania danych, jak i w trakcie samego modelowania 3D. Odpowiednio przygotowane dane otworowe są podstawą wykonania geologicznego modelu 3D służącego do wykonania map potencjału geotermii niskotemperaturowej. Pierwszy etap przygotowania polega na selekcji wielokryterialnej oraz scaleniu danych z baz otworowych PIG-PIB (CBDH, CBDG, BDGI, SMGP oraz Bazy Danych Geofizycznych – BDGF). Selekcja otworów jest wy-



Ryc. 39. Przykład zreinterpretowanego przekroju geologicznego z mapy SMGP dla pilotażowej mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej na obszarze aglomeracji warszawskiej

A – przekrój archiwalny wg SMGP; B – reinterpretacja przekroju; C – przekrój uproszczony na potrzeby modelowania 3D

konywana na podstawie kryteriów głębokości, poprawności lokalizacji (ujednolicenie układów odwzorowania do państwowego układu współrzędnych ETRS_1989_Poland_CS92) oraz występowania pełnych profili litologicznych w formacie cyfrowym. Przed scalaniem obiektów przygotowywana jest nowa struktura atrybutów podstawowej warstwy punktowej (metryki otworów) oraz struktura tabeli atrybutów opisującej profile litologiczne. Po ujednoliceniu struktury i uzupełnieniu brakujących atrybutów (np. rzędna terenu, symbol obszaru czy podstawa lokalizacji) należy przejść do drugiego etapu przygotowania bazy, polegającego na eliminacji obiektów pokrywających się (tzw. dubli), sprawdzeniu profili oraz ostatecznego wyboru otworów do seriowania geologiczno-termalnego dokonywanego przez zespół wykonujący prace modelowe (kryterium głębokości i lokalizacji – redukcja liczby otworów na obszarach o szczególnym zagęszczeniu np. drogi, ujęcia wody i in.)

Niektóre niezgodności i niejednoznaczności ujawniają się dopiero podczas analizy trójwymiarowej. Jeżeli stwierdzonego błędu nie daje się skorygować, należy zrezygnować z wykorzystania konkretnego otworu wiertniczego i usunąć go z bazy.

Podczas sprawdzania położenia rzędnej wysokości otworu, należy porównać podaną wartość z odpowiadającą mu wartością na rastrze numerycznego modelu terenu. Zaleca się zasto-

sowanie rzędnej położenia otworu odczytanej z NMT używanego w trakcie prac nad modelem 3D (rozdzielczość 25×25 m). Następnie należy przeanalizować te otwory, dla których różnica między podaną w bazie danych rzędą terenu a odczytaną z NMT jest większa niż 1 m. Najczęściej różnice w rzędnych mogą być spowodowane błędną lokalizacją otworu, lokalizacją otworu w rejonach hałd poeksploatacyjnych lub wyeksploatowanych złóż kopalin stałych (np. w kamieniołomach, wyrobiskach węgla brunatnego). W przypadku wątpliwości powinno się sprawdzać lokalizację otworu na wycinkach map geologicznych lub topograficznych bądź odwołać się do dokumentacji źródłowej.

Innym możliwym błędem w bazie danych dotyczącym otworów może być brak spójności między stropem a spągiem kolejnej warstwy. Błędy te można łatwo kontrolować np. poprzez dodatkowe kolumny w tabeli Excel wraz z odpowiednią formułą sprawdzającą. Jednocześnie należy weryfikować czy miąższość warstwy zawsze jest większa niż 0.

Obszary zaburzone glacitektonicznie, szczególnie w sytuacji naprzemiennego występowania utworów czwartorzędowych i neogeńskich, pozostających w dowolnych, często złożonych relacjach, należy uwzględnić już na etapie uzgadniania definicji serii SGT. W takim wypadku, kierując się kryteriami o których mowa w rozdziale 5.4, wskazane jest utworzenie odrębnej pozycji (dodatkowej serii SGT) odzwierciedlają-

cej utwory zaburzone glaciektonicznie i ustalenie jej prawidłowej relacji stratygraficznej względem innych pozycji SGT. W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się współwystępowanie niezaburzonych utworów czwartorzędowych i neogeńskich, wraz z zaburzonymi utworami glaciektonicznymi zawierającymi różnowiekowe osady. O wieku takiego zaburzonego wydzielenia decyduje osad wyraźnie dominujący, a w przypadku jego braku, należy przypisać wiek samej deformacji (zwyczajowo czwartorzęd).

W technicznym aspekcie, na etapie przypisywania serii SGT do warstw litologicznych otworów wiertniczych, należy wdrożyć mechanizm zabezpieczający, którego praca polega na pozbawieniu osoby kodującej otworową bazę danych możliwości przypisania błędnej pozycji ze słownika SGT tj. takiej, która w danym przedziale głębokościowym otworu byłaby młodsza od zakodowanej wyżej, lub starsza od zakodowanej niżej. Mechanizm zabezpieczający powinien działać w taki sposób, że na rozwijalnej liście, aktualizowanej po każdym wpisie, nie są widoczne żadne pozycje niepoprawne stratygraficznie. Oznacza to, że zakres pozycji dostępnych do wyboru z rozwijalnej listy słownika SGT zależy od miejsca w otworze wiertniczym z którego został wywołany. Tym sposobem pozycje SGT będą figurować w otworze wiertniczym zawsze we właściwej i uwzględniającej ewentualne zaburzenia glaciektoniczne kolejności. Takie podejście umożliwia uwzględnienie i przedstawienie w modelu bazowym 3D zaburzeń glaciektonicznych, fałdów obalonych, naprzemianlegle zazębiających się pakietów warstw itp., czyli lokalnych sytuacji, kiedy warstwy geologiczne nie zalegają zgodnie z zasadą superpozycji i nie powoduje powstawania artefaktów obliczeniowych bądź całkowitego zaburzenia pracy algorytmu obliczeniowego.

W przypadku konieczności przyjęcia założeń uwzględniających w/w zagadnienia na etapie definiowania SGT i tworzenia profilu wzorcowego (syntetycznego) należy kierować się zaleceniami wg instrukcji do Mapy Geologicznej Polski (MGP) w skali 1:200 000 (Gałązka D.

i in. 2009)., w której utwory starsze od czwartorzędu, ale oderwane w procesach glaciektonicznych, należy zaliczyć do czwartorzędu

Na podstawie doświadczenia zdobytego w ramach pilotażowego projektu opracowano założenia dotyczące stworzenia narzędzia walidującego poprawność numeracji kolejnych serii geologiczno-termalnych na potrzeby algorytmu obliczeniowego.

Podczas kodowania warstw należy też sprawdzać czy SGT występują we właściwej kolejności stratygraficznej, tj. czy utwory starsze znajdują się pod młodszy. W tym przypadku też kontrola jest możliwa dzięki dodatkowej kolumnie sprawdzającej w tabeli Excel.

Należy zwracać uwagę, aby sumaryczna miąższość warstw wchodzących w skład SGT wynosiła przynajmniej 2 m, co jest warunkiem brzegowym poprawnego wykonania modelu 3D jednostki. W przypadku mniejszych wartości mogą pojawiać się błędy interpolacyjne podczas prac nad modelem, np. wzajemne przecinanie się stropu i spągu jednostki.

Jeżeli w danym wydzieleniu litologicznym przedstawionym na karcie otworu wiertniczego występują błędy w klasyfikacji stratygraficznej lub w opisie litologiczno-petrograficznym, należy dane cyfrowe porównać z dokumentami oryginalnymi bądź opisem litologicznym innych, najbliższych położonych otworów przewierających rozpatrywane wydzielenia.

5.8. WIRTUALNE OTWORY WIERTNICZE

Do poprawnego skonstruowania jednostek geologiczno-termicznych w modelu 3D na obszarze przykładowego arkusza mapy w skali 1:50 000, w zależności od lokalnej budowy geologicznej potrzeba ok. 2 000–4 000 punktów dokumentacyjnych, którymi mogą być otwory wiertnicze, odsłonięcia naturalne i sztuczne, w tym: rowy ziemne, szyby i szybiki kopalniane. Najważniejsze są otwory wiertnicze, wśród których zazwyczaj najwięcej jest płytkich odwiertów geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych do 20 m głębokości, a najmniej głębokich otworów poszukiwawczych przewier-

cających wiele SGT. Skutkiem takiego stanu rzeczy wraz z głębokością otworów zmniejsza się też liczba tych, które są przydatne do wykorzystania i do stworzenia poprawnego modelu 3D. Liczba uwzględnionych otworów i jakość opisów ich profili litologicznych bezpośrednio oddziałuje na poprawność i szczegółowość wyróżnionych SGT użytych w modelu 3D. Dlatego w ramach prac przygotowawczych i przetwarzania danych należy dokonać wstępnej oceny i selekcji otworów wiertniczych, odpowiadając na poniżej zadane pytania:

- Czy i ile w danej serii geologiczno-termalnej wykonano wierceń?
- Które SGT są penetrowane przez dany otwór lub ich zespół?
- Czy profil litologiczny danego wiercenia reprezentuje typową dla danej lokalizacji miąższość SGT?
- Gdzie koncentrują się otwory wiertnicze, a które rejony są ich pozbawione?

W celu stworzenia modelu o wyższym poziomie szczegółowości, należy wygenerować otwory wirtualne (ryc. 40), uzupełniające gęstość pokrycia modelowanego obszaru zebranymi danymi archiwalnymi na temat lokalizacji spągów wydzielen SGT z otworów wiertniczych. Otwory wirtualne są tworzone w programie GeoStar na podstawie zaseriowanych, zgodnie z profilem syntetycznym, przekrojów geologicznych. Należy przyjąć odpowiednią odległość zadanego skoku odległości pomiędzy generowanymi otworami (np. 200 m). Efektem utworzenia szeregu otworów wirtualnych z zadanym skokiem jest chmura punktów informująca o współrzędnych oraz rzędnej spągów wydzielen SGT, służąca do modelowania 3D (ryc. 41, 42).

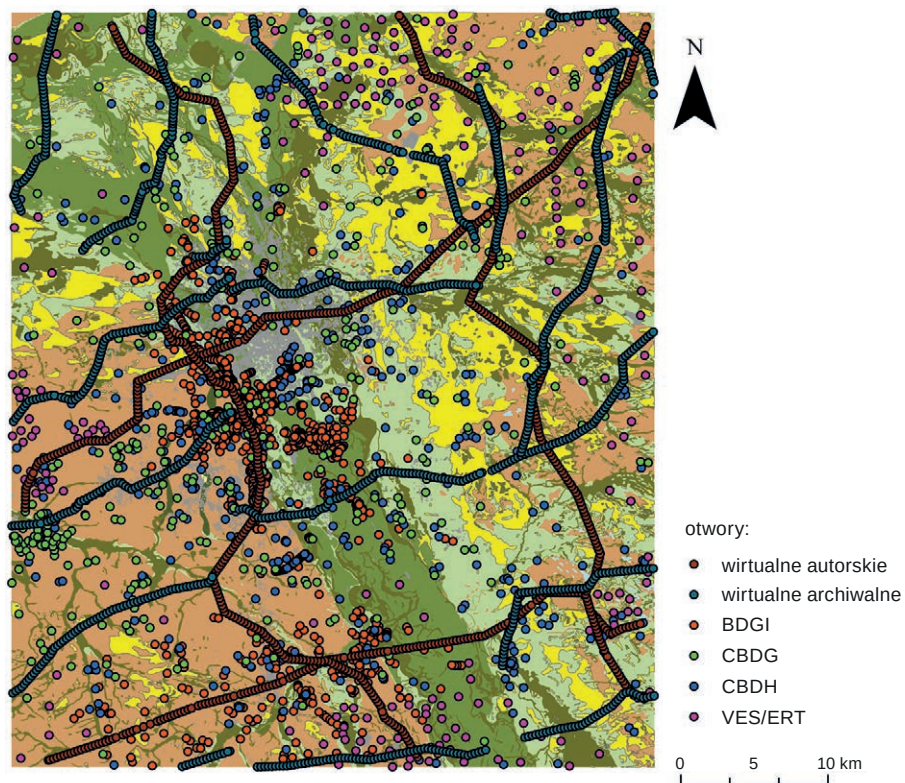
Otwory wirtualne są tworzone na dwa sposoby. Pierwszy polega na digitalizacji archiwalnych przekrojów geologicznych (np. SMGP – ryc. 43), oraz wstępnym zaseriowaniu, uwzględniającym pionowe następstwo warstw (ryc. 44). W kolejnym kroku przekrój generalizujemy (ryc. 45), łącząc wydzielenia należące do jednakowych wydzielen SGT na podstawie opracowanego profilu syntetycznego (przykład

– załącznik 5). Drugi sposób polega na wykorzystaniu zaseriowanej bazy otworowej (BDGI, CBDG, CBDH, dane geofizyczne) do stworzenia autorskich przekrojów geologicznych w miejscach o niewystarczającym pokryciu danymi geologicznymi, bądź wymagających doszczegółowienia ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną (ryc. 46). Podsumowując, generowanie otworów wirtualnych z przekrojów geologicznych zapisanych w formacie wektorowym (np. przy pomocy oprogramowania GeoStar lub Global Mapper) to dobry sposób na szybkie zagęszczenie ilości danych i zwiększenia rozdzielczości modelu geologicznego w oprogramowaniu 3D.

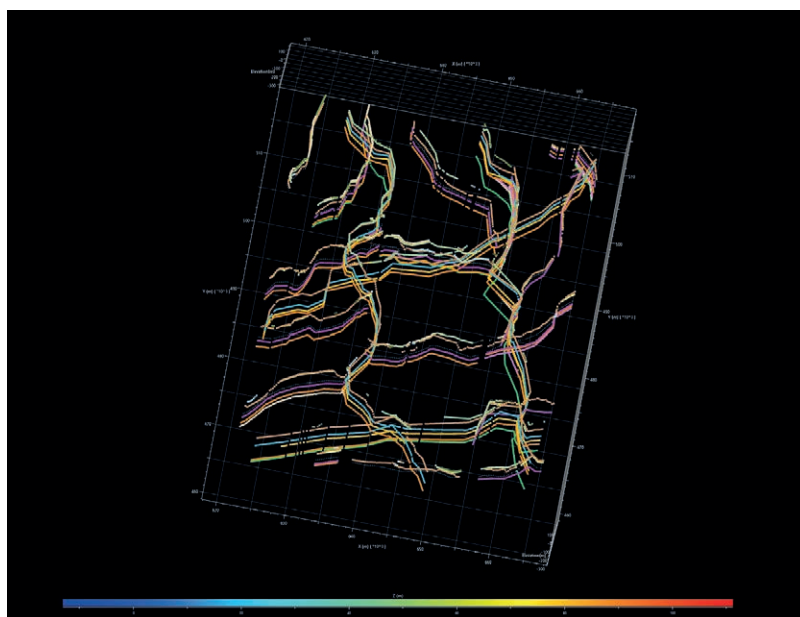
5.9. SIEĆ USKOKÓW

Elementy tektoniczne tworzonego modelu 3D są reprezentowane przez sieć uskoku (rzadziej przez nasunięcia, strefy ścinania lub inne struktury), której układ przenoszony jest do środowiska GIS z bazowej mapy geologicznej SMGP jako informacja liniowa. Zaimportowany plik linii uskoku w formie .shp w środowisku GoCAD zazwyczaj rzutuje się na powierzchnię i przedłuża się do zasięgu siatki bazowej (*mastergrid*), uzyskując pionową, uproszczoną powierzchnię uskoku. Sieć wyjściową uskoku należy przeanalizować z wykorzystaniem otworów wiertniczych i przekrojów geologicznych pod kątem ich wpływu na rozmieszczenie serii geologiczno-termalnych. Zaleca się dokonanie selekcji i maksymalne uproszczenie sieci uskoku (np. wyeliminowanie uskoku przypuszczalnych i drugorzędnych) tak, aby uwzględnić najważniejsze struktury mające istotne, regionalne znaczenie dla odwzorowania SGT, np. rozgraniczenie jednostek zbudowanych ze skał osadowych, magmowych lub metamorficznych.

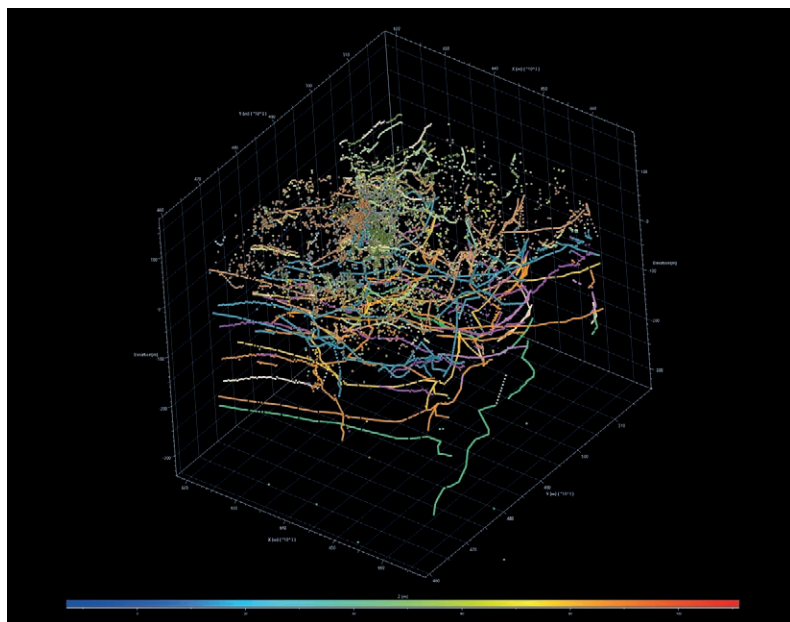
Przy opracowywaniu modelu 3D niezbędne jest określenie typu uskoku (pionowy, normalny, inwersyjny) i położenia powierzchni uskokowej. Należy więc określić istotne elementy uskoku, w tym kąt upadu. W celu ułatwienia procesu modelowania 3D, zaleca się nadanie jak największej liczbie dyslokacji charakteru uskoku pion-



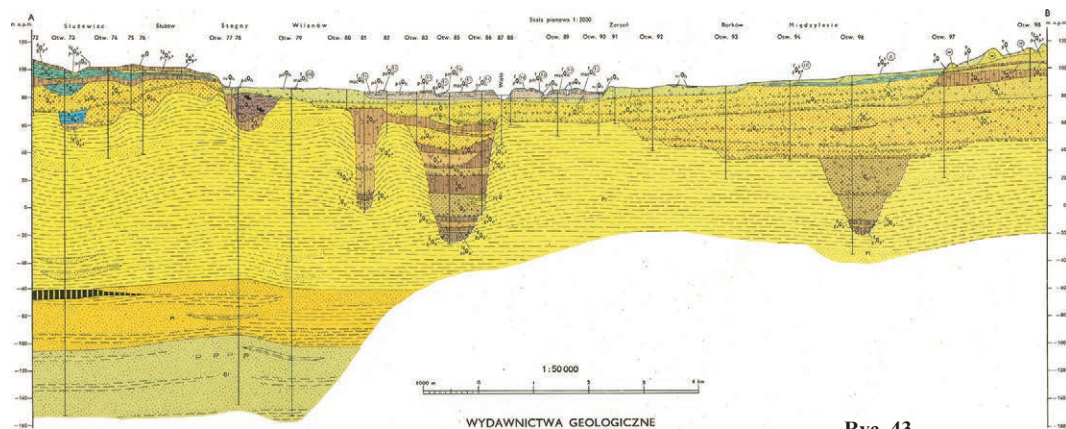
Ryc. 40. Widok bazy danych GIS z naniesioną lokalizacją wygenerowanych otworów wirtualnych



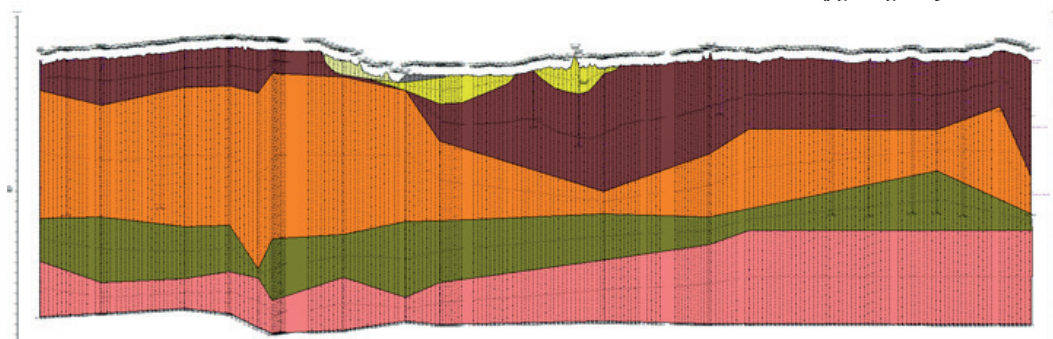
Ryc. 41. Chmura wygenerowanych punktów reprezentujących spagi wydzieleń SGT na podstawie otworów wirtualnych w rzucie poziomym. Widok w środowisku oprogramowania do modelowania 3D GoCAD/SKUA



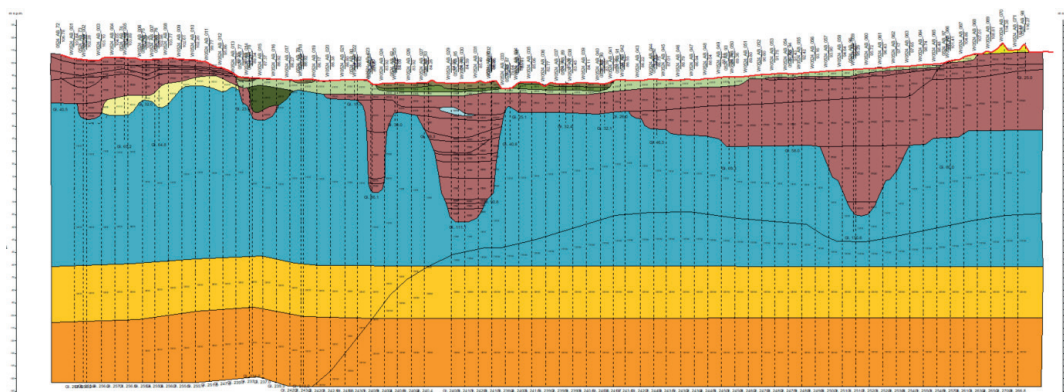
Ryc. 42. Chmura wygenerowanych punktów reprezentujących spągi wydzieleń SGT na podstawie otworów wirtualnych w rzucie pionowym. Widok w środowisku oprogramowania do modelowania 3D GoCAD/SKUA



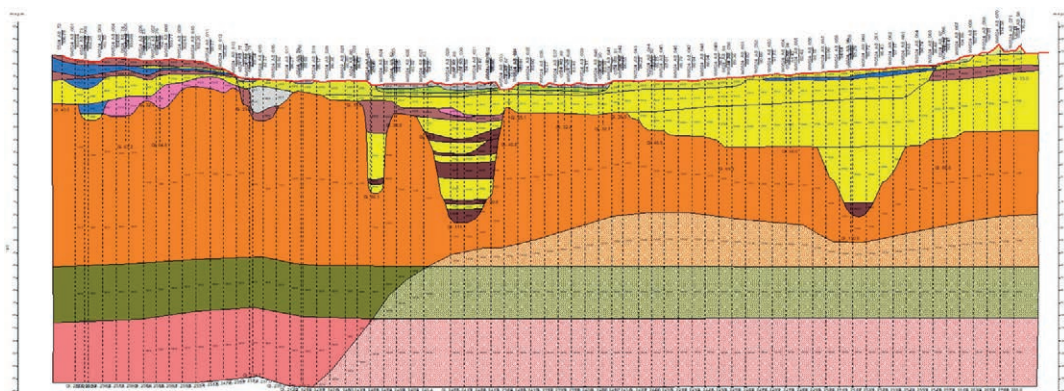
Ryc. 43.
Przekrój geologiczny SMGP



Ryc. 44. Autorski przekrój geologiczny utworzony na podstawie Bazy Otworowej z wygenerowanym szeregiem otworów wirtualnych



Ryc. 45. Przecrój zgeneralizowany i zaseriowany zgodnie z profilem syntetycznym z szeregiem otworów wirtualnych



Ryc. 46. Zdigitalizowany i zaseriowany przekrój SMGP z szeregiem otworów wirtualnych

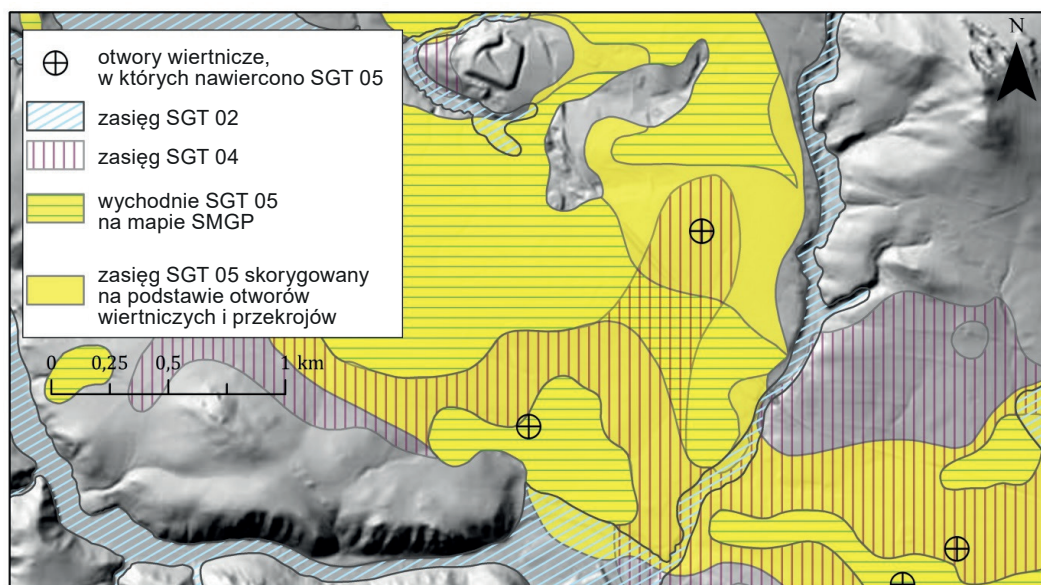
nowych. Jedynie w dobrze udokumentowanych i uzasadnionych przypadkach uskokom lub nasunięciom można przypisać odpowiedni kąt upadu.

5.10. WYZNACZANIE POWIERZCHNIOWEGO ZASIĘGU SERII GEOLOGICZNO-TERMALNYCH

Po uporządkowaniu otworowej bazy danych i zaseriowaniu profili litologicznych otworów wiertniczych wg ustalonej zbiorczej legendy, należy wyznaczyć granice powierzchniowego zasięgu wszystkich serii geologiczno-termalnych. Zasięg SGT musi mieć charakter mapy odkrytej, tj. granice każdej kolejnej (wg chronostratygrafii) serii muszą przedstawiać jej rozprzestrzenienie także pod utworami je przykry-

wającymi (młodszy) (ryc. 47). Wyznaczanie rozprzestrzenienia serii powinno odbywać się na podstawie danych z otworów wiertniczych, dostępnych map geologicznych, profili wiertniczych oraz innych dostępnych materiałów (np. dane geofizyczne). Zasięg danej serii jest więc definiowany przez zasięg jej spągu, który jest niezależny od faktu, czy dana SGT tworzy wychodnię na powierzchni terenu, czy też występuje tylko w głębszych partiach górotworu.

Tworzenie i edycję zasięgów serii geologiczno-termalnych przeprowadza się z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi środowiska GIS, wspomagających poprawną topologię poligonów zasięgów SGT i wzajemną późniejszą spójność poszczególnych elementów przyszłego modelu trójwymiarowego.



Ryc. 47. Wyznaczanie powierzchniowego zasięgu serii geologiczno-termalnej 05 na obszarze Jelenia Góra w projekcie MPGN

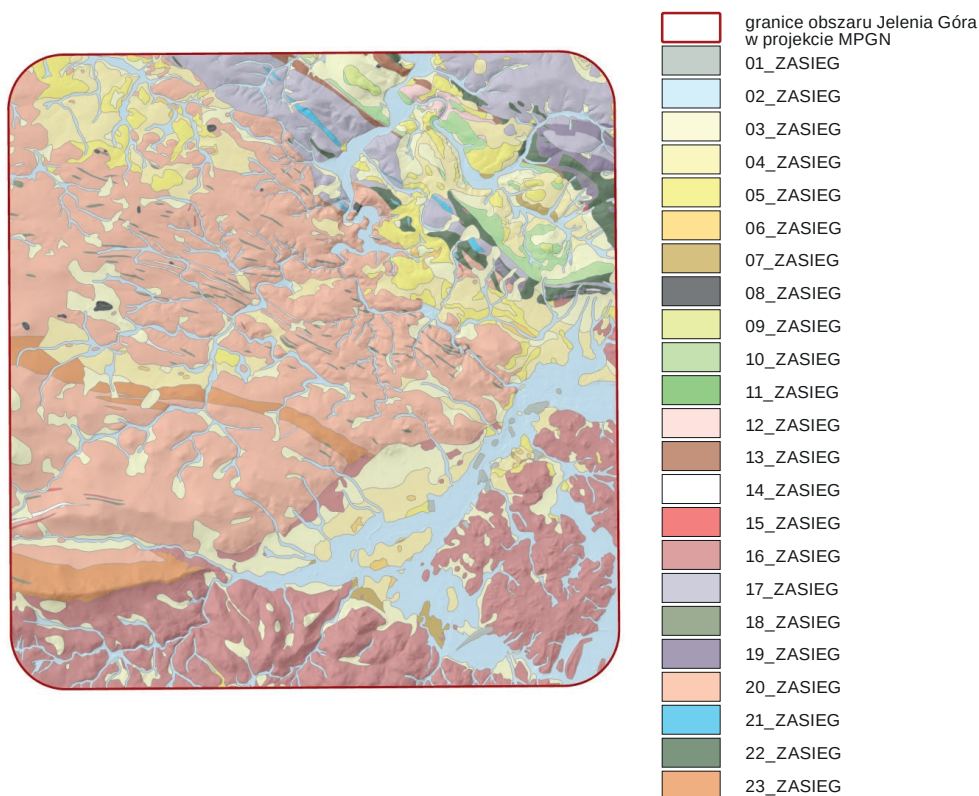
W przypadku wykorzystania cyfrowego obrazu wychodni jednostek geologicznych pobranego ze zbioru warstw SMGP w skali 1:50 000 należy w pierwszej kolejności sprawdzić wiarygodność granic SGT odstaniających się na powierzchni terenu poprzez ich porównanie z rzeczywistą sytuacją morfologiczną przedstawioną na numerycznym modelu terenu (NMT). Podczas takiej analizy można dodatkowo posłużyć się mapami topograficznymi o większej rozdzielczości (np. 1:10 000, 1:25 000) oraz zdjęciami lotniczymi. Najwięcej rozbieżności, wymagających odpowiednich korekt, spotyka się na obszarach, gdzie graniczą ze sobą zróżnicowane genetycznie utwory wieku czwartorzędowego, np. krawędzie dolin rzecznych wraz z towarzyszącymi im skarpami wyższych tarasów zalewowych i osadami dennymi. Powinno się unikać bliskiego nakładania zasięgów SGT, tak aby uprościć konstrukcje przyszłego modelu 3D.

Kolejnym krokiem jest powiększenie lub zmniejszenie zasięgu SGT o obszary, w których odpowiednio stwierdzono lub nie stwierdzono wydzieleni skalnych danej SGT (np. na podstawie danych z nowych otworów wiertniczych

wykonanych już po opublikowaniu arkusza SMGP). Na tym etapie, w oparciu o posiadaną wiedzę i dane geologiczne, dokonuje się redukcji bądź poszerzenia zasięgu analizowanego fragmentu wybranej serii geologiczno-termalnej. Zadanie to można wykonać, posługując się zarówno narzędziami GIS, jak i oprogramowaniem umożliwiającym modyfikowanie obiektów w przestrzeni trójwymiarowej. Wyrysowanie zasięgu SGT jest zadaniem pracochłonnym i wymagającym ciągłej kontroli oraz weryfikacji tworzonych poligonów. Należy pamiętać, że dobre przygotowanie danych pozwala na stworzenie spójnego modelu 3D.

W trakcie wykreślania rozprzestrzenienia serii geologiczno-termalnych należy zwracać uwagę na następujące elementy:

- otwór, w którym nawiercono serię geologiczno-termalną, musi znajdować się także w granicach zasięgu SGT,
- otwór, w którym nie nawiercono SGT, nie może znajdować się w granicach zasięgu takiej serii, WYJĄTEK: gdy otwór jest płytszy niż przypuszczalny strop serii, np. otwór ma 10 m ale i znajduje się w zasięgu serii, której strop jest na głębokości 50 m;



Ryc. 48. Powierzchniowy zasięg serii geologiczno-termalnych (SGT) dla obszaru Jelenia Góra w projekcie MPGN

- obecność serii na przekrojach geologicznych i zinterpretowanych profilach geofizycznych;
- wyrysowany zasięg serii spełnia kryteria wielkościowe (wielkość obiektu przynajmniej 10 000 m²).

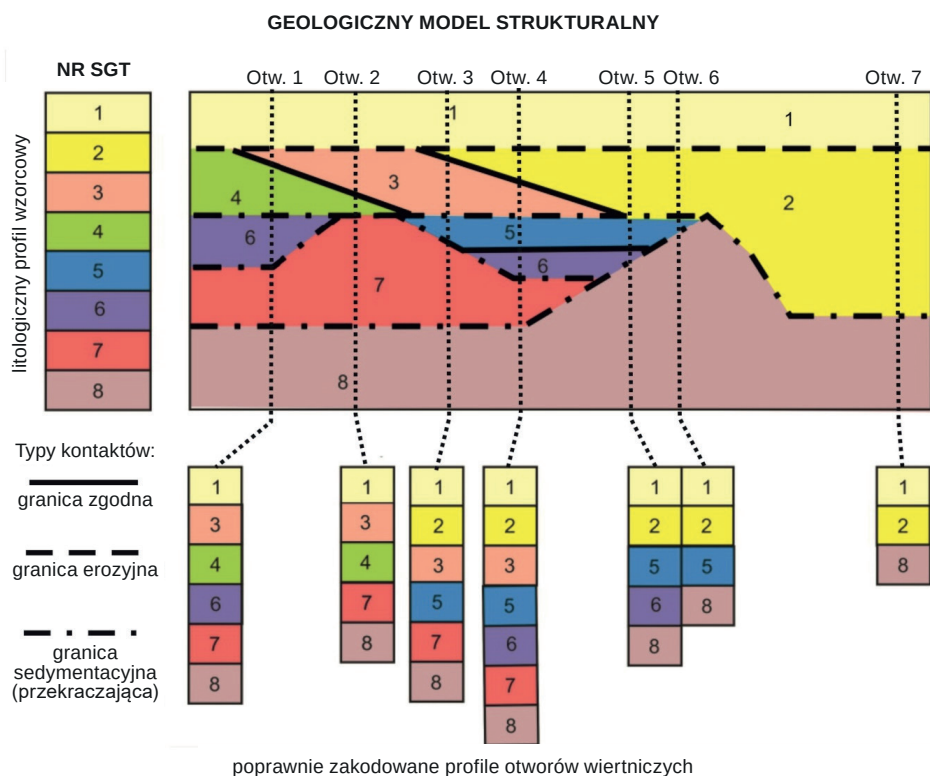
Wynikiem wyznaczenia powierzchniowego zasięgu serii geologiczno-termalnych jest zbiór danych przestrzennych (warstwa poligonowa w geobazie lub plik *.shp) osobny dla każdej SGT (ryc. 48).

5.11. GEOLOGICZNY MODEL STRUKTURALNY – RELACYJNY SCHEMAT PRZESTRZENNY SERII GEOLOGICZNO-TERMALNYCH

Podstawowe założenia geologicznego modelu strukturalnego, na którym oparty będzie model bazowy 3D, są obrazowo przedstawione

w koncepcyjnym schemacie przestrzennym serii geologiczno-termalnych (ryc. 49) Schemat ten jest graficzną kombinacją standardowego profilu geologicznego i zróżnicowanych relacji kontaktowych między wyróżnionymi seriami. Określa on więc względne położenie i charakter kontaktów wszystkich obiektów geologicznych - SGT, które mają być modelowane. Umożliwia też przedstawienie zasad korelacji i pozycji strukturalnej między seriami o tym samym wieku względnym (co nie zawsze wynika z profilu syntetycznego) np. dwóch wyraźnie odmiennych facji utworów górnej kredy - piaskowców i mułowców.

Schemat przestrzenny SGT stanowi jedno z najważniejszych narzędzi modelowania 3D, ponieważ pomaga w poprawnym przypisaniu określonej sekwencji warstw w profilach otworów wiertniczych do konkretnej serii zawartej



Ryc. 49. Schemat ideowy geologicznego modelu strukturalnego z wyróżnieniem relacji przestrzennych jednostek geologiczno-geotermicznych i typów kontaktów. Schemat ułatwia kodyfikację profili otworów wiertniczych zgodnie z odpowiednim dla modelowanego obszaru profilem syntetycznym

w standardowym profilu geologicznym. Schemat ułatwia interaktywną kontrolę jakości kodowania profili otworów wiertniczych i poprawną konstrukcję geologicznego modelu 3D. Jest on również niezbędny do poprawnego zaindekso-

wania poligonów wydzielen na zdigitalizowanych przekrojach geologicznych w celu późniejszej automatycznej generacji profili otworów wirtualnych.

6. KONTROLA JAKOŚCI DANYCH PRZETWORZONYCH – WEJŚCIOWYCH DLA MODELU BAZOWEGO 3D

Kontrola jakości to proces polegający na sprawdzaniu poprawności wszystkich danych wykorzystywanych i wprowadzonych do środowiska GIS i do oprogramowania w celu opracowania modelu 3D. Współrzędne XYZ modelowanych obiektów i inne informacje geologiczne należy sprawdzić pod kątem ich wzajemnego,

stosunku przestrzennego, tak aby uzyskać spójny i poprawny geologicznie zestaw danych.

Kontrola jakości danych wejściowych obejmuje sprawdzenie prawidłowego importu informacji pozyskanych z baz danych otworowych i niekiedy bezpośrednio z kart otworów wiertniczych (nieuwzględnionych wcześniej

w bazach). Kontrola może obejmować dane dotyczące lokalizacji, brakujących informacji (np. profilu litologicznego, stratygrafii), a także sprawdzenie spójności importowanych granic serii geologiczno-termalnych.

Zbiory danych wejściowych (głównie danych serii geologiczno-termalnych z bazy otworów wiertniczych) muszą być zharmonizowane i spełniać następujące wymagania:

- przygotowane w formacie danych cyfrowych z odniesieniem geograficznym;

- zgodne ze zharmonizowaną listą atrybutów i parametrów, które porządkują treść tematyczną z użytymi jednostkami fizycznymi;
- używają wspólnego kodowania stratygrafii i numeru badanego obszaru;
- każdy zestaw danych to jeden wiersz w tabeli metadanych.

Dla każdego zbioru danych wejściowych należy wygenerować zestaw danych i metadanych, tzn. jeden zestaw dla wszystkich danych otworów wiertniczych, jeden dla wszystkich danych mapy geologicznej, jeden dla wszystkich danych sieci uskoków.

7. MODELOWANIE GEOLOGICZNE 3D NA PODSTAWIE WYRÓŻNIONYCH SERII GEOLOGICZNO-TERMALNYCH

Stworzenie geologicznego, trójwymiarowego modelu bazowego 3D polega na zastosowaniu matematycznych i informatycznych metod obliczeniowych pozwalających na jednolite odwzorowanie typu, geometrii i właściwości obiektów geologicznych, z uwzględnieniem wszelkiego rodzaju danych związanych z tymi obiektami. Rezultatem strukturalnego modelowania 3D jest zestaw spójnych pod względem strukturalnym i stratygraficznym obiektów, prezentujących budowę podłoża skalnego z pewnym poziomem uproszczenia. Do opracowania modelu 3D wykorzystuje się specjalistyczne oprogramowania komputerowe np. GoCAD/SKUA (Emerson), które pozwala na import zbiorów danych zgromadzonych w środowisku GIS. Zestawienie typu danych wejściowych i ich przekształcenie w format danych dostosowany do użycia przez program GoCAD przedstawia tabela 9. Możliwe jest również stosowanie programów równoważnych, takich jak np. Petrel, GeoScene 3D.

Model 3D określa geometrię obiektów i charakter ich powierzchni granicznych. Ogólny styl strukturalny powinien maksymalnie odwzorowywać rzeczywiste, nieodkształcone lub zdeformowane formy geologiczne (np. naturalną sekwencję skał osadowych, pasy fałdowo-naśwucze, rowy tektoniczne, intruze itp.) i składać

się ze spójnych, jednoznacznie zdefiniowanych brył oraz granic między nimi, którymi mogą być kontakty depozycyjne (sedymentacyjne, erozyjne), intruzywne i tektoniczne. Podrzędne mezostruktury tektoniczne lub sedymentacyjne występujące wewnątrz modelowanych obiektów, takie jak np. foliacja metamorficzna, fałdy śródformacyjne, są zwykle pomijane w geometrycznych modelach 3D.

Pierwszym krokiem w modelowaniu 3D jest analiza informacji i opracowanie spójnej koncepcji geologiczno-strukturalnej dla całego badanego obszaru w oparciu o opisane w poprzednim rozdziale materiały: mapy i przekroje geologiczne, zbiór danych otworowych, zbiorczą legendę, profil syntetyczny i numeryczny model terenu. Ich finalna synteza pozwala na określenie stopnia złożoności modelu oraz wybór sposobu konstrukcji modelu 3D, który można przeprowadzić dwoma metodami: modelując powierzchnie stropowe lub spągowe. Wybór techniki modelowania zależy od wykonawcy, niemniej w niniejszej Instrukcji zaleca się stosowanie modelowania powierzchni spągowych oraz wykonanie modelu w domenie głębokości w układzie odwzorowania PL-1992. Proces modelowania należy zacząć od weryfikacji zaimportowanych danych w środowisku 3D i wyłapaniu błędów związanych z lokalizacją otworów i intersekcją na NMT

Tabela 9. Typy danych wejściowych i ich transformacja do formatu modelowania 3D w oprogramowaniu GoCAD

Typ danych	Dostępny format danych	Stosowany format importu danych w oprogramowaniu GoCAD
Otworki wiertnicze	Tabela ACCESS	Plik tekstowy (.csv)
Wirtualne otworki wiertnicze	Tabela ACCESS	Plik tekstowy (.csv)
Graniczne powierzchnie modelu: górna (NMT) i dolna	Siatka ESRI GRID	obiekty punktowe (węzły) siatki Grid
Deformacje tektoniczne (uskoki, strefy ścinania)	Obiekty liniowe	Obiekty liniowe .shp
Przekroje geologiczne	Pliki programów graficznych wyeksportowane w formacie .jpg	Pliki .jpg
Linie przekrojów	Obiekty liniowe	Obiekty liniowe .shp
Granice zasięgu jednostek geologiczno-geotermicznych	Poligony (wielokąty) – pliki *.shp	Poligony (wielokąty) .shp
Izolinie spągu jednostek geologiczno-geotermicznych (z map warstwicznych)*	Obiekty liniowe – pliki *.shp	Obiekty liniowe lub punktowe .shp

* gdy dane tego typu są dostępne

(kontrola jakości). Podczas prac modelarskich, czyli interpolacji poszczególnych powierzchni modelu strukturalnego, zakłada się, że największa ilość danych jest dostępna dla warstw znajdujących się na powierzchni terenu i są to: dane z wierceń, wychodnie wydzieleń SMGP wraz z danymi z NMT. Wydzielenia takie, jak osady rzeczne czy wydmy, wymagają większego zaangażowania w ich wymodelowanie, natomiast w modelowaniu geotermalnym ich wpływ jest minimalny, przyjęto zatem uproszczenia polegające na przyjęciu regionalnej miąższości dla całego modelu. Przy wydzieleniach kenozoicznych (głównie plejstocénskich) zakrytych i częściowo zakrytych należy zdefiniować zasięg występowania, a ich modelowanie przeprowadzić w poszczególnych obszarach występowania, a następnie połączyć w jedno wydzielenie. Dla powierzchni całkowicie zakrytych, z małą ilością informacji o ich przebiegu (głównie są to punkty z otworów wiertniczych), przyjmuje się większy stopień generalizacji, powierzchnię mogą kształtować także powierzchnie nadległe, w postaci wcięć erozyjnych. Przy modelach geotermalnych założono dla uproszczenia modelu, że uskoki będą pionowe, a ich przebieg będzie wytyczony na podstawie opracowań archiwalnych. Należy

również dokonać wyboru kolejności modelowania serii geologiczno-termalnych. Zaleca się modelowanie w trybie „od góry do dołu”, zgodnie z ustalonym profilem wzorcowym. Każda seria jest w bazie danych ograniczona poprzez jej strop i spąg, lub poprzez spąg oraz miąższość. Model trójwymiarowy składa się z zestawu wewnątrznie jednorodnych ciał geologicznych, które mają wspólne granice i są względem siebie rozłączne. W celu jednoznacznego określenia przestrzeni trójwymiarowej ustanawia się prostokątną siatkę bazową (*mastergrid*) o ściśle zdefiniowanej pojedynczej komórce rastra (zalecana rozdzielczość, zgodna z wytycznymi GeOPLASMA-CE to 25×25 m) i rozciągłości przestrzennej w określonym układzie współrzędnych (przykładowo Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych 1992 – PUWG-1992).

Opracowanie modelu bazowego 3D opiera się na spójnym wykorzystaniu dwóch metod, w pierwszej kolejności odwzorowania rzeczywistych danych geologicznych (granic wysokościowych, zasięgu i miąższości SGT), a następnie ich modelowaniu drogą interpolacji 3D.

Konstrukcję modelu bazowego 3D rozpoczyna się od opracowania sieci uskokiów, a następnie tworzy się obiekty – ciała SGT. Do ich

uformowania wykorzystuje się zaimportowane ze środowiska GIS: (i) przestrzenne (lateralne) zasięgi SGT, ustanowione wg aktualnego stanu danych otworowych, (ii) rzeczywiste i wirtualne otwory wiertnicze odpowiednio zakodowane, wg ustalonego profilu syntetycznego, a także (iii) zreinterpretowane przekroje geologiczne i inne obrazy pomocnicze np. sondowania geofizyczne z zaznaczonymi granicami SGT. Następnie wykonuje się „model blokowy” pozbawiony luk i wzajemnego „nakładania się” modelowanych serii. Warunki przestrzennego układu SGT muszą być przedstawione w sposób wiernie oddający ich miąższość i granice. Tam gdzie jest to geologicznie uzasadnione, zaleca się, aby modelowane utwory czwartorzędowe lub paleogeńsko-neogeńskie nie były przecinane i zrzucane przez uskoki. Przy konstruowaniu geoobjektów topograficzne formy powierzchniowe, takie jak np. biegi rzek, skarpy drogowe lub nasypy kolejowe nie mogą „przebijać się” ponad ustanowioną powierzchnię NMT.

Po zaimportowaniu danych i fazie „ręcznego” wyznaczania powierzchni (linii) granicznych SGT, ich dalsze modelowanie przeprowadza się metodą interpolacji, opierającą się na wykorzystaniu algorytmów geostatystycznych. Najszerze zastosowanie ma metoda DSI (*Discrete Smooth Interpolation*). Opracowany za jej pomocą model 3D może być przedstawiony jako zespół powierzchni granicznych SGT zbudowanych z wielobocznego układu sieci trójkątów (tzw. sieć triangulowana – TIN) albo jako serie przestrzenne modelu (tzw. bryły - ang. *solids*).

Podczas konstrukcji modelu bazowego 3D często pojawiają się błędy i niespójności topologiczne, które należy na bieżąco korygować interaktywnie. Może się również zdarzyć sytuacja, że to z aktualnie tworzonego modelu 3D wynika bardziej wiarygodna sytuacja geologiczna, niż ta przedstawiona w otworach wiertniczych, np. gdy w jednym z otworów przedstawiono zbyt małą miąższość utworów danej SGT w porównaniu do sąsiadujących otworów nawiercających tą samą serię. Należy wówczas

dokonać odpowiedniej korekty w bazie danych otworowych. Kontrola jakości modelu 3D obejmuje najczęściej odpowiedź na następujące pytania:

- Czy pojawiają się fragmenty modelowanych obiektów geologicznych wystających ponad wysokościowy, numeryczny model terenu?
- Czy wszystkie ważne struktury geologiczne są obecne w modelu 3D?
- Czy kontakty między seriami geologicznymi są ukazane w sposób prawidłowy?
- Czy liczba niezgodności (np. erozyjnych) jest prawidłowa?
- Czy występują nagłe i lokalne zmiany grubości/miąższości serii, które mogą świadczyć o niepoprawnych danych otworowych?
- Czy bloki (masy skalne) ograniczone przez uskoki są konsekwentnie modelowane?
- Czy przedstawione rozmiary przesunięcia (zrzutu) mas skalnych wzdłuż uskoków są prawidłowe?
- Czy struktury fałdowe są zbieżne z modelem koncepcyjnym i danymi wejściowymi?
- Które elementy w modelu 3D nie są efektem prawidłowego przetwarzania danych? Czy mogą być to artefakty?
- Czy wzajemna topologia wydzielen SGT jest zachowana (nie może występować ujemna miąższość warstw!)?

Sprawdzenia poprawności modelu można dokonać, korzystając z oprogramowania 3D lub na podstawie danych przestrzennych (powierzchnie spągu, rozkład miąższości SGT) wyeksportowanych do środowiska GIS w formacie rastra. W programie GoCAD dostępne jest też narzędzie do opracowywania wirtualnych przekrojów powierzchni SGT, przy pomocy którego można kontrolować położenie przestrzenne konstruowanych serii modelu między sobą.

W oprogramowaniu GoCAD należy wykonać eksport gotowych powierzchni w dwójaki sposób:

- export GoCAD ascii (.ts) w postaci pliku tekstowego z zapisanym zasięgiem oraz geometrią powierzchni w dedykowanym układzie

odniesienia (PL-1992). Plik taki można zwizualizować w przeglądarkach Geo3D którymi dysponuje PIG-PIB,

- w formie ascii (export/surface/custom ascii) jako zbiór punktów x, y, z i zasięgu warstwy jako *.dxf (export/curve/dxf) na potrzeby wykonania rastra obliczeniowego.

Przykłady modelowania 3D przedstawiono w załączniku 8.

7.1. DOPASOWANIE GRANIC DO SĄSIEDNICH MODELI 3D

Jeżeli opracowywany model bazowy graniczy z innym, już istniejącym modelem 3D lub ma być jego uzupełnieniem, należy przeprowadzić procedurę ciągłego i zharmonizowanego dopasowania sieci uskoków oraz granic/krawędzi serii geologiczno-termalnych. Na styku obu modeli nie mogą występować żadne nagłe zmiany wysokości, skoki miąższości lub nachylenia graniczących SGT, zwłaszcza wzdłuż linii wykorzystanych przy konstrukcji przekrojów geologicznych. Czynności korelacyjne, w sensie merytorycznym, należy oprzeć na harmonizacji tabel zbiorczych i profili wzorcowych, a zastosowane rozwiązania techniczne przenieść i kontynuować dla obu są-

siadujących modeli. W niektórych miejscach stref granicznych konieczna może się okazać modyfikacja istniejących modeli 3D.

Jak pokazuje praktyka, interpretacja geologiczna w obrębie arkuszy seryjnych SMGP w rejonach o skomplikowanej budowie geologicznej (jak np. Karpaty fliszowe) nie jest oczywista. Interpretacje tych samych arkuszy przez różnych autorów, mających inne koncepcje geologiczne, znacznie różnią się od siebie. Dotyczy to w szczególności reambulowanych arkuszy SMGP w Karpatach i arkuszy starszych. W takich przypadkach dowiązanie arkuszy w rejonach ich granic może być zajęciem bardzo skomplikowanym i pracochłonnym. W wielu przypadkach sąsiadujące arkusze SMGP: „nowy” i „stary” nie pasują do siebie, co w zasadzie implikuje wykonanie reambulacji całości sąsiadujących „starych” arkuszy. Dotyczy to również wyznaczania granic SGT w strefach buforowych. W powyższych przypadkach zaleca się jedynie dowiązanie interpretacji geologicznej w obrębie bufora do dostępnych otworów, bez konieczności reinterpretacji budowy geologicznej. Zadania obejmujące pełną reinterpretację powinny być wykonane w dowiązaniu do innych prac służby geologicznej, np. prac nad reambulacją arkuszy SMGP.

8. WYKONANIE I EKSPORT SIATEK POWIERZCHNI GRANICZNYCH SERII GEOLOGICZNO-GEOTERMICZNYCH

Do opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej należy wygenerować zestaw wszystkich powierzchni reprezentujących dolne granice (spągi) serii geologiczno-termalnych przygotowanych w formie ortogonalnej siatki rastrowej 2D, która musi mieć ten sam układ odniesienia przestrzennego tj. lokalizację, rozdzielczość i zasięg co siatka bazowa (*mastergrid*). Raster, w formacie GeoTIFF, tworzy się na podstawie modelu 3D poprzez przekształcenie i rzutowanie odczytanych z powierzchni

triangulowanych TIN wartości rzędnych (wysokości nad poziomem morza) powierzchni spągowej danej SGT (oznaczanej skrótem BOT) w punktach węzłowych siatki o wymiarach 25×25 m. Komórki rastrowe znajdujące się poza daną SGT są definiowane poprzez wartość „braku danych” – NULL - (-9999). Jako alternatywę dla siatek TIN, możliwe jest stosowanie siatki prostokątnej (o oczku zbieżnym z siatką *mastergrid* 25×25 m), stosowanych w środowisku oprogramowania Petrel (Schlumberger).

9. SYNTEZA DANYCH HYDROGEOLOGICZNYCH – OPRACOWANIE SIATKI OBLICZENIOWEJ

Bardzo ważnym czynnikiem decydującym o wartości przewodności termicznej gruntów i skał jest ich stopień nasycenia wodą, który znacząco ją zwiększa, zwłaszcza w osadach odznaczających się wysoką porowatością jak np. piaski i żwiry. Z tego powodu, na potrzeby opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej, należy w modelu bazowym 3D stworzyć (wymodelować) dodatkową powierzchnię określającą głębokość zalegania stropu warstwy wodonośnej. Powierzchnia ta może przecinać różne serie geologiczno-termalna (SGT) i generalnie dzieli cały model 3D na część górną – „suchą” oraz część dolną – „zawodnioną”, czyli odpowiednio strefy aeracji i saturacji. Ostatnią czynnością tego procesu jest przekształcenie uformowanej powierzchni na format rastra (w formacie ESRI GRID lub równoważnym) kompatybilnego z bazową siatką wiodącą przedstawiającego głębokość zalegania stropu strefy saturacji podaną w metrach poniżej powierzchni terenu, czyli stropu części dolnej modelu (zawodnionej).

Do konstrukcji warstwy definiującej odległość stropu warstwy zawodnionej od powierzchni terenu należy użyć dostępnych hydrogeologicznych materiałów kartograficznych. Zatem do konstrukcji tej warstwy materiałem referencyjnym będą opracowane już przez PIG-PIB mapy hydrogeologiczne, tj. mapy głównego użytkowego oraz pierwszego od powierzchni terenu poziomu wodonośnego MHP PPW. Z map tych pozyskać należy warstwy informacyjne zawierające wyinterpretowane głębokości zalegania poziomów wodonośnych.

Na potrzeby konstrukcji siatki obliczeniowej głębokości hydroizobat należy wykorzystać wartość odpowiadającą środkowi danego przedziału głębokości PPW i taką wartość przyjąć do analiz obliczeniowych. Z punktu widzenia finalnego wyliczenia prognozowanej wartości efektywnej przewodności termicznej jest to podejście optymalne. Przyjęcie środka przedziału powoduje przypisanie w profilu komórki obliczeniowej modelu bezpiecznego oszacowania głębokości wy-

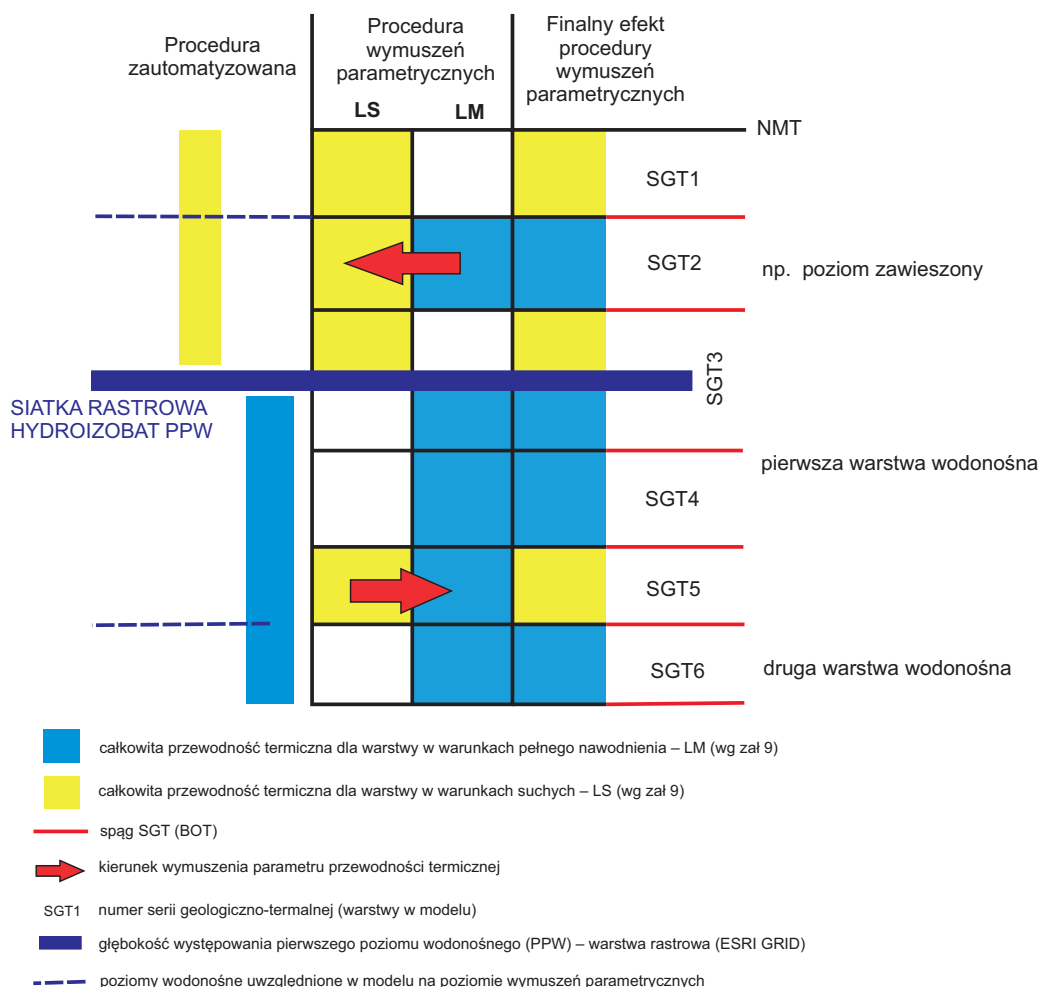
stępowania PPW. W przypadku przyjęcia górnej bądź dolnej granicy przedziału PPW uzyskiwany byłby odpowiednio znacząco wyższy lub niższy wynik oszacowania efektywnej przewodności termicznej. Założono, że należy unikać sytuacji przeszacowania lub niedoszacowania potencjału geotermii niskotemperaturowej.

Na obszarach, gdzie brak jest tego typu opracowań kartograficznych, należy posłużyć się dostępnymi danymi punktowymi zawierającymi informacje hydrogeologiczne, głównie danymi z CBDH, ale również z innych dostępnych zasobów archiwalnych. Wskazane jest wykorzystanie odpowiednich zapisów o stanach wód w punktach monitoringu wód podziemnych (np. sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych PIG-PIB), danych o nawierconym zwierciadle wód w otworach wiertniczych, czy też opracowanych już lokalnych map stropu warstw wodonośnych. W przypadku kiedy nie jest dostępna warstwa MHP PPW, wszystkie zgromadzone dane hydrogeologiczne pochodzące z różnych źródeł i podlegające wahaniom czasowym, należy połączyć w jeden zharmonizowany zapis danych. Służy to wytworzeniu warstwy informacyjnej zawierającej dane o zaleganiu stropu warstwy wodonośnej, która musi być kompatybilna z już istniejącymi mapami dla obszarów sąsiednich. Dlatego w/w prace należy wykonywać zgodnie z metodyką przyjętą dla opracowania Mapy Hydrogeologicznej Polski Pierwszy Poziom Wodonośny.

Po analizie danych hydrogeologicznych, bazowy model 3D badanego obszaru dzieli się na dwie części odpowiadające strefom: „zawodnionej” (strefa saturacji) oraz „suchej” (strefa aeracji). W przypadku występowania sytuacji wielowarstwowego systemu wodonośnego: strefa sucha/zawodniona/sucha (itd.), istnieje techniczny sposób na zamodelowanie wariantów takiego układu. Robi się to nie za pomocą dodatkowej warstwy tj. kolejnej ujednoliconej warstwy hydroizobat w postaci rastrowej siatki obliczeniowej GRID, a zamiast tego zakłada się, że występowanie kolejnej dolnej suchej warstwy jest

uwzględniane na poziomie parametryzacji bazy otworowej w wydzieleniach danej SGT (wartości przewodności termicznej (λ) dla skał suchych są dla takiej warstwy przypisywane w bazie otworowej dla obu kolumn λ skały suchej i λ skały mokrej, odpowiednio pola LS i LM otworowej bazy danych – patrz załącznik 9). Wypełnianie pól bazy otworowej danych LS i LM w sytuacji odwzorowywania wielowarstwowego systemu wodonośnego wymaga arbitralnych, autorskich wymuszeń parametrycznych w obrębie tych SGT w których chcemy wymusić zawodnienie

bądź jego brak. Ideę takiego podejścia ilustruje rycina 50. Następnie prowadzona jest parametryzacja SGT w całym jej zasięgu występowania, tj. modelowanie rozkładu parametrów LS i LM algorytmem interpolacyjnym IDW. Dzięki wprowadzonym wymuszeniom parametrycznym, finalne siatki rastrowe GRID rozkładu parametrów LS i LM dla warstw SGT poddanych wymuszeniom, odzwierciedlają zawodnienie lub jego brak w tych SGT i w efekcie finalny efekt obliczeń modelu parametrycznego uwzględnia wielowarstwowość systemu wodonośnego.



Ryc. 50. Schematyczny sposób uwzględniania wielowarstwowych systemów wodonośnych w algorytmie obliczeniowym potencjału geotermii niskotemperaturowej

Podejście takie wynika z przyjęcia kryterium wydajnościowego jako priorytetu dla algorytmu obliczeniowego oraz uwzględnienia ograniczeń zastosowanych w nim formuł obliczeniowych (wielowarstwowe iteracyjne obliczenia algebry rastrów). Jest ono również stosowane na potrzeby technicznego modelowania zwierciadła wód podziemnych na obszarach wystąpień niespękanych i niezwietrzałych skał krystalicznych, gdzie także przyjmuje się, że λ skały suchej i λ skały mokrej mają niemal identyczne wartości. Zatem w tych skałach poziom wód gruntowych, które z przyczyn oczywistych nie migrują wewnątrz masywu skalnego, pozostaje bez znaczenia.

Odrębnie należy traktować rejonry wychodni skał magmowych, metamorficznych i krystalicznych posiadających różny stopień spękania i uszczelinowacenia i tym samym cechujących się skrajnymi parametrami wodonośności (od praktycznie zerowych do bardzo wysokich). Współczynnik przewodności termicznej λ , mieści się w przedziale określonym przez pełen zakres możliwych do wystąpienia wartości parametru przewodności termicznej tj. minimalną przewodność termiczną dla skały krystalicznej suchej (zwietrzałej i spękannej) oraz maksymalną wartość określaną przez parametr charakterystyczny dla skały krystalicznej zawodnionej (zwietrzałą i spękaną). W tak określonym dopuszczalnym zakresie zmienności przewodności termicznej λ , wartość faktyczna tej przewodności jest determinowana przez stopień rozbudowy systemu spękań, drożność hydrauliczną oraz obecność wody. Aspekt ten należy uwzględniać na etapie przygotowywania siatek rozkładu przewodności termicznej dla skał suchych i zawodnionych, poprzez dokonanie zróżnicowania interpolowanego parametru, stosownie do lokalnych cech tektonicznych i litologicznych ośrodka skalnego, mających skrajny wpływ na parametry wodonośności (od praktycznie zerowych do bardzo dobrych). Na etapie przygotowywania siatek rozkładu przewodności termicznej dla skał suchych i zawodnionych należy odpowiednio zróżnicować te dwa parametry kluczowe (LS i LM, wg załącznika 9) przy wyliczaniu finalnych map potencjału geotermii niskotemperaturowej.

Na obszarze zawodnionym wyróżnia się obszary z wodami podziemnymi o zwierciadle swobodnym lub napiętym. W przypadku zwierciadła swobodnego do dalszych obliczeń używa się bezpośrednio odczytów o stanie wód, natomiast dla zwierciadła napiętego przyjmowana jest wartość dla spągu warstwy napinającej/stropu warstwy wodonośnej.

Na podstawie danych o głębokości stropu warstwy wodonośnej można wygenerować hydroizobaty, zamieniane następnie na zbiór danych punktowych, który można poddać pierwszej interpolacji metodą krigingu. Uzyskany w ten sposób zbiór punktów jest importowany do programu zawierającego finalny, bazowy geologiczny model 3D, a następnie, w celu stworzenia ciągłej warstwy danych i ich weryfikacji, kreuje się metodą interpolacji DSI (*Discrete Smooth Interpolation*) powierzchnię stropu pierwszej warstwy zawodnionej, odejmując od rzędnej powierzchni terenu (reprezentowanej przez NMT) rzędną zalegania stropu warstwy wodonośnej. Otrzymana w ten sposób powierzchnia zawiera informację z głębokością od powierzchni terenu stropu pierwszej warstwy wodonośnej i umożliwia poprawienie ewentualnych błędów (topologicznych lub artefaktów obliczeniowych) powstałych podczas interpolacji DSI, podobnie jak w przypadku modelowania powierzchni granicznych (spągów – BOT) dla SGT. Tak przygotowana warstwa jest następnie przekształcana na formę rastra zgodnie z właściwościami siatki bazowej 25×25 m. Do interpolacji powierzchni rastrowych (tzw. gridów) jako alternatywę algorytmu DSI dopuszcza się algorytmy lub zestawy narzędzi (*toolbox*) wchodzące w skład oprogramowania z pakietów typu ArcGIS oraz Petrel lub równoważnych.

W przypadku swobodnego zwierciadła wód podziemnych i zastosowania danych o jego położeniu w formie rzędnych wysokościowych dane te bezpośrednio importuje się do oprogramowania 3D i modeluje powierzchnię zwierciadła metodą DSI, którą finalnie przekształca się na raster. W celu obliczenia głębokości zalegania wód podziemnych należy wczytać dwa zestawy danych rastrowych do oprogramowania systemów informacji przestrzennej typu ArcGIS lub QGIS:

cyfrowy model terenu (NMT) oraz powierzchnię zwierciadła wód podziemnych. Oba te zestawy danych muszą być zgodne z założeniami położenia węzłów i rozdzielczości siatki bazowej.

Za strefę bezwodną (aeracji) uznaje się utworu luźnych skał osadowych o niskiej przepuszczalności, zalegające ponad ustalonym poziomem zwierciadła wód podziemnych oraz jednostki zbudowane ze skał krystalicznych (magmowych i metamorficznych), wyznaczone zarysem ich wychodni. W spękanych i zwietrzałych skałach krystalicznych może pojawić się kolektor wodonośny o charakterze szczelinowym i szczelinowo-porowym, jednak wyznaczenie ciągłej powierzchni (głębokości) jego zalegania zwykle nie jest możliwe. Nasylenie wodą skał krystalicznych masywnych lub słabo spękanych (przy bardzo małej lub nieznacznej szczelinowatości skał) jest zerowe lub bardzo małe i nawet wówczas tylko nieznacznie zwiększa ono wartości ich przewodności termicznej. Nie stanowi to z reguły czynnika mającego istotny wpływ na wynik określania średniej ważonej przewodności termicznej w profilu na poziomie obliczeń prowadzonych dla całego modelu parametrycznego. W przypadku stwierdzenia w profilu obecności skał o silnym spękaniu lub porowatości, należy dodać odpowiednią poprawkę (współczynnik zwiększający przewodność termiczną w stanie zawodnionym). Taki współczynnik korekcyjny powinien zostać wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych, a jego zastosowanie pozwoli na uwzględnienie większej porowatości (jest to mnożnik zawierający się zwykle w przedziale wartości 1,05–1,10). Tak zastosowana poprawka ma później wpływ na wyliczanie wartości przewodności termicznej dla skał mokrych i zawodnionych.

Na potrzeby technicznego modelowania zwierciadła wód podziemnych w środowisku GIS, na obszarach wystąpień bezwodnych skał krystalicznych określonych granicami ich wychodni, w miejscu ich występowania tworzy się sztuczną powierzchnię fikcyjnego zwierciadła ze stałą przypisaną głębokością ok. 200–250 m p.p.t. (odpowiadającą praktycznie głębokości dolnej granicy bazowego modelu 3D). Powierzchnia ta musi być położona poniżej zakresu przedziałów

głębokościowych, dla których będą opracowywane mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej. Wartość 200–250 m p.p.t. jest więc czysto fikcyjna i pełni jedynie funkcję znaku (wypełniacza) na potrzeby przeprowadzenia obliczeń numerycznych. Należy w tym miejscu nadmienić, że w celu opracowania map potencjału geotermii niskotemperaturowej, dla wszystkich utworów zalegających na obszarach zawodnionych pod wyznaczoną powierzchnią odpowiadającą głębokości występowania stropu warstwy wodonośnej, w tym skał magmowych i metamorficznych oraz w obszarach fliszu karpackiego, przyjmuje się wartości przewodności termicznej w stanie zawodnionym (dla strefy saturacji; załącznik 9 – patrz kolumna LM w bazie otworowej).

W obszarach fliszu karpackiego dominującym typem warunków hydrogeologicznych jest system wodonośny o charakterze szczelinowo-porowym. Jedynie w obrębie dużych dolin rzecznych oraz kotlin możemy mówić o ośrodku porowym. Zarówno doliny rzeczne jak i kotliny stanowią strefę drenażu dla sąsiadujących z nimi obszarów morfologicznie położonych wyżej (flisz karpacki). Istnieje zatem kontakt hydrauliczny pomiędzy poziomami wodonośnymi: szczelinowo-porowym fliszu karpackiego oraz porowym w warstwach czwartorzędowych. Zakładając pewną schematyzację warunków przyjmuje się, że warstwy geologiczne (czyli SGT w modelu bazowym 3D i w modelu parametrycznym) znajdujące się pod czwartorzędowymi osadami wypełniającymi doliny rzeczne, w których na hydrogeologicznych materiałach kartograficznych wyznaczone zostały poziomy wodonośne, również są zawodnione. Jest to przyjęty na potrzeby niniejszej Instrukcji sposób schematyzacji warunków hydrogeologicznych, wzorowany na dobrych praktykach stosowanych w modelowaniu hydrogeologicznym przepływu wód podziemnych. W oparciu o wyniki takiego modelowania określa się m.in. bilans wodny, będący podstawą racjonalnej gospodarki zasobami wodnymi. Jest to pewne uproszczenie skomplikowanych lokalnie warunków hydrogeologicznych, jednak niezbędne do realizacji tego zadania i wynika z przyjęcia jako priorytet kryterium wydajnościowego algorytmu obliczeniowego.

10. OPRACOWANIE MODELU PARAMETRYCZNEGO: KODOWANIE WYDZIELEŃ LITOLOGICZNO-PETROGRAFICZNYCH W PROFILACH OTWORÓW WIERTNICZYCH I PRZYPISANIE IM WARTOŚCI PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ W STANIE SUCHYM I ZAWODNIONYM

Przewodność termiczna jest właściwością materiałów, np. gruntów i skał (wg pojęć geologii inżynierskiej) opisującą, jak dobrze dany materiał (ośrodek) przewodzi ciepło. Im wartość ta jest wyższa tym dany materiał lepiej przewodzi ciepło. W przypadku skał zależy ona zasadniczo od ich składu mineralnego, rozkładu uziarnienia, porowatości i nasycenia wodą. Każda seria geologiczno-termalna SGT opisana w profilu otworu wiertniczego (wydzielona na podstawie stratygrafii i/lub właściwości hydrogeologicznych), zbudowana jest z wielu pojedynczych warstw skalnych odznaczających się specyficznym typem petrograficznym. Zmienność petrograficzna tych warstw charakteryzuje jednocześnie zmienność przewodności termicznej w obrębie danej SGT. Innymi słowy, pojedyncza SGT może więc być zbudowana ze skał jednolitych pod względem petrograficznym (np. granitów) lub też składać się z kilku lub kilkunastu (i więcej) różnych, naprzemianległych warstw/pokładów reprezentujących odmienne typy petrograficzne (np. w zestawie warstw piaskowców, mułowców i iłowców w utworach fliszowych). Listę należy na bieżąco aktualizować o nowo napotkane podczas prac archiwizacyjnych odmiany skalne.

Po zakończeniu modelowania 3D i ostatecznej modyfikacji otworowej bazy danych opracowuje się model parametryczny. Istotą tego procesu jest nowe kodowanie każdej pojedynczej warstwy litologiczno-petrograficznej opisanej w profilach wszystkich otworów, polegające na przypisaniu im specjalnego znacznika, tzw. kodu petrograficznego PETKOD (ang. PET-key), który ustala się korzystając z przygotowanego uprzednio dla każdego obszaru badawczego (arkusza mapy) zbiorczego zestawienia/ słownika (załącznik 1). Kod składa się z ciągu liter lub cyfr i oznacza określony typ litologiczno-petrograficzny (np. piasek gruboziarnisty, gra-

nit, gnejs). Operacja ta ma na celu standaryzację często rozbudowanego słownie opisu podobnych i powtarzających się w otworach wydzieleń skalnych i ich kwalifikację wg jednolitego uporządkowanego schematu. Do tego celu można wykorzystać używane w bazie CBDG kody liczbowe dla oznaczenia poszczególnych typów utworów skalnych (załącznik 7). W przypadku gdy w słowniku brakuje odpowiedniej litologii, dopuszczalne jest na potrzeby projektu dodawanie własnych oznaczeń i kodów. Używane w projekcie MPGN PETKODY zbudowane są z 7 cyfr, na które składają się kody skały głównej oraz domieszek. Schemat sposobu tworzenia symbolu PETKOD znajduje się na rycinie 51, a przykład takiego symbolu na rycinie 52.

Skały pozbawione domieszki otrzymują kod zgodny z oznaczeniami stosowanymi w CBDG i BDGI, a cztery ostatnie miejsca zarezerwowane na kod domieszki oraz jej relację do skały głównej, wypełniane są wartościami zero.

Odpowiednio do przypisanego kodu petrograficznego, dla każdej warstwy skalnej lub gruntowej w otworze, definiuje się właściwą przewodność termiczną, którą należy określić zarówno w stanie suchym, jak i w stanie nasyconym wodą. Parametr ten, szczególnie w przypadku skał osadowych, w dużym stopniu zależy od zawartości wody. Jeśli skała jest zwięzła, jak np. granit, jego przewodność termiczna w stanie zawodnionym i suchym jest generalnie taka sama lub o zbliżonej wartości. Niemniej z uwagi na konstrukcję użytego do kalkulacji map potencjału geotermii niskotemperaturowej algorytmu obliczeniowego wymagane jest określenie obu tych wartości.

Proces kodowania zbiorczej tabeli otworów można przeprowadzić ręcznie, stosując funkcje programu Excel, lub też półautomatycznie, np. z wykorzystaniem skryptów (makr Visual Basic) Excela lub języka programowania Python lub innych narzędzi (np. specjalistycznych modułów



Ryc. 51. Schemat sposobu tworzenia symbolu PETKOD w Bazie Otworowej

w ramach oprogramowania Petrel lub ArcGIS). Przetworzone w ten sposób dane otworowe muszą być zebrane w jednej tabeli wynikowej dla wszystkich otworów wiertniczych wykonanych na badanym obszarze, zawierającej następujące kolumny:

- identyfikator otworu (ID),
- współrzędne lokalizacyjne (geograficzne) otworu,
- miąższość/grubość wszystkich warstw litologicznych opisanych w profilu otworu,

PRZYKŁAD:
piasek gliniasty PETKOD 0380000

038	0	000
kod skały głównej według CBDG	brak skały dodatkowej więc wartość 0	brak skały dodatkowej więc wartość 000

PRZYKŁAD:
piasek gliniasty z domieszką żwiru PETKOD 0381021

038	1	021
kod skały głównej według CBDG	wartość 1 oznaczająca domieszkę	kod skały dodatkowej według CBDG (kod 21 poprzedzony 0)

Ryc. 52. Przykład tworzenia symbolu PETKOD w Bazie Otworowej

- unikatowy kod identyfikacyjny serii geologiczno-termalnej (IDKOD), do której należą określone warstwy,
- znacznik – kod petrograficzny (PETKOD) każdej warstwy litologicznej,
- przewodność termiczna skały w stanie suchym,
- przewodność termiczna skały w stanie zawodnionym.

Przykład takiej rozbudowanej tabeli otworowej bazy danych przedstawia [załącznik 9](#).

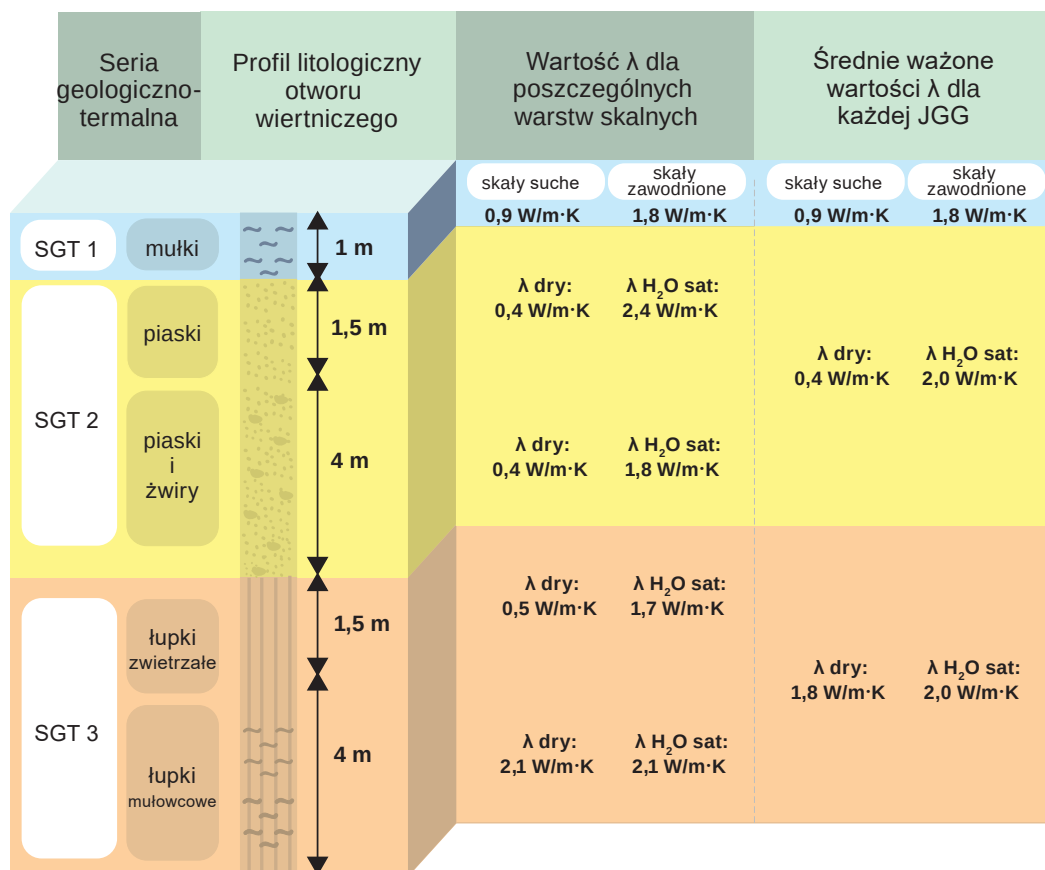
11. OPRACOWANIE MAP ROZKŁADU ŚREDNIEJ PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ SKAŁ DLA MODELOWANEGO OBSZARU I W OKREŚLONYCH PRZEDZIAŁACH GŁĘBOKOŚCI PODŁOŻA SKALNEGO

11.1. OBLICZENIE WARTOŚCI ŚREDNIEJ WAŻONEJ PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ (WG MIĄŻSZOŚCI WARSTW) DLA KAŻDEJ SERII GEOLOGICZNO-TERMALNEJ WYRÓŻNIONEJ W OTWORZE WIERTNICZYM

Proces wykonania map potencjału geotermii niskotemperaturowej rozpoczyna się od obliczenia wartości średniej ważonej przewodności termicznej dla każdej serii geologiczno-termalnej wyróżnionej w otworze wiertniczym. Wartość ta obliczana jest jako średnia wartość

ważona wg miąższości/grubości wszystkich warstw skalnych (o różnych typach petrograficznych) budujących dany odcinek profilu otworu i przypisany do jednej SGT. Średnią ważoną oblicza się dwukrotnie, tj. osobno dla skał w stanie suchym i dla skał w stanie zawodnionym (ryc. 53).

Uzyskane wartości są reprezentatywne dla przewodności termicznej dla każdej serii geologiczno-termalnej we wszystkich otworach wiertniczych, w których seria ta występuje i są głównym rezultatem modelowania parametrycznego. Użycie specjalnego skryptu (makro Visu-



Ryc. 53. Schemat ideowy kalkulacji średniej ważonej przewodności termicznej dla skał w stanie suchym (λ dry) i zawodnionym (λ H₂O sat.) na przykładzie profilu otworu wiertniczego składającego się z pięciu warstw litologicznych należących do trzech serii geologiczno-termalnych

al Basic MS Excel) pozwala na automatyczne przeprowadzanie tych obliczeń. Po wykonaniu tej czynności zostaje utworzona nowa tabela, która zawiera tylko jeden wpis (wiersz) dla każdej serii geologiczno-termalnej. Tabela składa się z następujących kolumn:

- identyfikator otworu (ID),
- współrzędne lokalizacyjne (geograficzne) otworu, miąższość/grubość SGT,
- kod identyfikacyjny SGT (IDKOD),
- średnia przewodność termiczna skał w stanie suchym,
- średnia przewodność termiczna skał w stanie zawodnionym.

11.2. PODZIAŁ ZESTAWU DANYCH ŚREDNIEJ PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ NA OBIEKTY PUNKTOWE DLA KAŻDEJ SERII GEOLOGICZNO-TERMALNEJ (SGT)

Przetworzona tabela, będąca efektem czynności z rozdziału 11.1, jest następnie importowana do środowiska GIS, gdzie dane każdej serii geologiczno-termalnej są przekształcane w obiekty punktowe, przedstawiające reprezentatywne średnie ważone wartości przewodności termicznej we wszystkich otworach wiertniczych, w których jednostka ta występuje. Ponieważ zbiór danych składa się z wielu punktów

o tych samych współrzędnych XY (z powodu pionowego położenia otworów wiertniczych), należy go podzielić na osobne zestawy danych dla każdej SGT, z uwzględnieniem dwóch kluczowych do dalszych obliczeń atrybutów – przewodności termicznej w stanie suchym i w stanie zawodnionym.

11.3. INTERPOLACJA ŚREDNIEJ PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ SKAŁ W STANIE SUCHYM I ZAWODNIONYM METODĄ ODWRÓCONYCH ODLEGŁOŚCI (IDW)

Obliczone wartości średniej przewodności termicznej skał w stanie suchym i zawodnionym przypisane każdej serii geologiczno-termalnej w otworach wiertniczych importuje się do środowiska GIS i poddaje interpolacji (z użyciem narzędzia Spatial Analyst, funkcja IDW) w celu oszacowania tych parametrów w miejscach, gdzie żadne dane nie są dostępne, czyli dla obszarów położonych pomiędzy otworami. W wyniku przeprowadzonej procedury otrzymuje się wynik modelowania dla całego badanego obszaru, w tym też dla jego fragmentów pozostających poza granicami modelowanej serii geologiczno-termalnej. Aby uruchomić proces interpolacji wyłącznie w obrębie granic jednej SGT, należy oznaczyć raster geometryczny (raster zasięgu powierzchni spągowej, zgodny z siatką bazową tej jednostki jako maski). Ponieważ maska musi być inna dla każdej SGT, należy interpolować przewodność termiczną osobno dla skał w stanie suchym i zawodnionym tylko dla jednej jednostki w jednym kroku. Wynikiem tego etapu pracy są dwa zestawy danych rastrowych dla jednej SGT – jeden raster opisuje przewodnictwo termiczne dla skał suchych, a drugi dla skał zawodnionych.

Interpolację wykonuje się zazwyczaj metodą Sheparda (metoda aproksymacji wielowymiarowej) lub interpolacją ważonych odwrotnych odległości (ang. *Inverse Distance Weighting* - IDW), która ma charakter metody deterministycznej opartej o znany zbiór rozproszonych punktów. Szacowanie (nieznanej) wartości dla

punktów położonych pomiędzy punktami o znanej wartości oblicza się za pomocą średniej ważonej wartości punktów znanych. Waga, czyli czynnik warunkujący, przypisany do konkretnego punktu w obliczeniach, zależy od odległości tego punktu od innych punktów posiadających już przypisaną wartość. Metodę tę można użyć dla zmiennych zależnych od przestrzeni, których podobieństwo maleje wraz ze wzrostem odległości. Model matematyczny nie może uwzględniać anizotropii i trendów. Istnieje możliwość określenia maksymalnej liczby punktów objętych obliczeniami, a domyślnie liczba ta wynosi 12.

11.4. KALKULACJA ŚREDNICH WARTOŚCI PRZEWODNOŚCI TERMICZNEJ SKAŁ PODŁOŻA W RÓŻNYCH PRZEDZIAŁACH GŁĘBOKOŚCI I OPRACOWANIE WYNIKOWYCH MAP POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ

W opisywanym etapie prac dane modelu parametrycznego przedstawiające średnie przewodności termiczne skał w stanie suchym i w stanie zawodnionym (zebrane w formie kompletu rastrowych w formacie ESRI GRID lub równoważnym) dla wszystkich serii geologiczno-termalnych łączy się (agreguje) w celu obliczenia średniej przewodności termicznej dla określonego przedziału głębokości poniżej powierzchni terenu, w każdej komórce obliczeniowej siatki bazowej (*mastergrid*) 25×25 m dla całego badanego obszaru. Procedura ta rozpoczyna się od zaimportowania do środowiska GIS, w którym już zdefiniowano przestrzeń roboczą projektu, trzech zestawów danych wejściowych obejmujących: (i) rastry (siatki ESRI GRID) - modele przestrzenne powierzchni spągowych wszystkich serii geologiczno-termalnych (tzw. BOT-y), (ii) rastry – z wartościami średniej przewodności termicznej (λ) dla skał w stanie suchym i dla skał w stanie zawodnionym obliczonymi dla każdej SGT wyróżnionej w modelu 3D oraz (iii) raster określający głębokość zalegania zwierciadła wód podziemnych (wyrażony w [m p.p.t.] – mapę hydroizobat). Kolejnym krokiem

z użyciem narzędzia GIS, służącego do intersekcji danych wejściowych, jest połączenie danych siatek λ dla skał suchych i wilgotnych. W efekcie połączeniu podlegają dwie części: jedną stanowią partie siatek λ dla skał w stanie suchym dla wszystkich SGT położonych powyżej zwierciadła wód podziemnych, a drugą partie siatek λ dla skał w stanie zawodnionym dla wszystkich SGT położonych poniżej zwierciadła wód podziemnych. Uzyskany w ten sposób scalony zbiór danych, reprezentatywny dla całej przestrzeni roboczej badanego arkusza, używa się do dokonania wyliczeń i wykonania finalnych rastrów (siatek ESRI GRID) prezentujących rozkład przestrzenny średniej przewodności termicznej podłoża skalnego dla określonych przedziałów głębokości. W celu wizualizacji tych parametrów jako finalnych map potencjału geotermii niskotemperaturowej można wybrać kilka reprezentatywnych przedziałów głębokościowych, np. od 0 do 40, 70, 100 i 130 m p.p.t. (przedziały takie miały zastosowanie w opracowaniu pilotażowych map potencjału geotermii niskotem-

peraturowej dla rejonów Zgorzelca w projekcie TransGeoTherm oraz Wałbrzycha w projekcie GeoPLASMA-CE). Ponieważ wraz z postępem technologii GPC stale rośnie liczba otworów wiertniczych, w których instalowane są otworowe wymienniki ciepła o głębokości ponad 200 m, perspektywicznie wydaje się rozważenie możliwości opracowywania map potencjału geotermii niskotemperaturowej dla pięciu przedziałów: od 0 do 50, 100, 150, 200 i 250 m p.p.t. Kwestia doboru przedziałów głębokościowych finalnych map jest wtórna do modelu bazowego 3D i modelu parametrycznego. W celu uzyskania zharmonizowanego produktu wyjściowego w postaci łatwo interpretowalnych map rozkładu średniej przewodności termicznej, symbolizację finalnych map średniej efektywnej przewodności termicznej należy oprzeć o ustalone zakresy wartości przewodności (klasy z wartościami progowymi), zgodnie z tabelą 10.

Zdefiniowanym w ten sposób klasom wartości przewodności termicznej przypisuje się odpowiadające im oznaczenie kolorystyczne,

Tabela 10. Przykład standardowej reklasyfikacji przedziałów wartości przewodności termicznej (*average thermal conductivity*) na paletę kolorów RGB przedstawionych na wynikowych mapach potencjału geotermii niskotemperaturowej (źródło: materiały projektu GeoPlasma-CE)

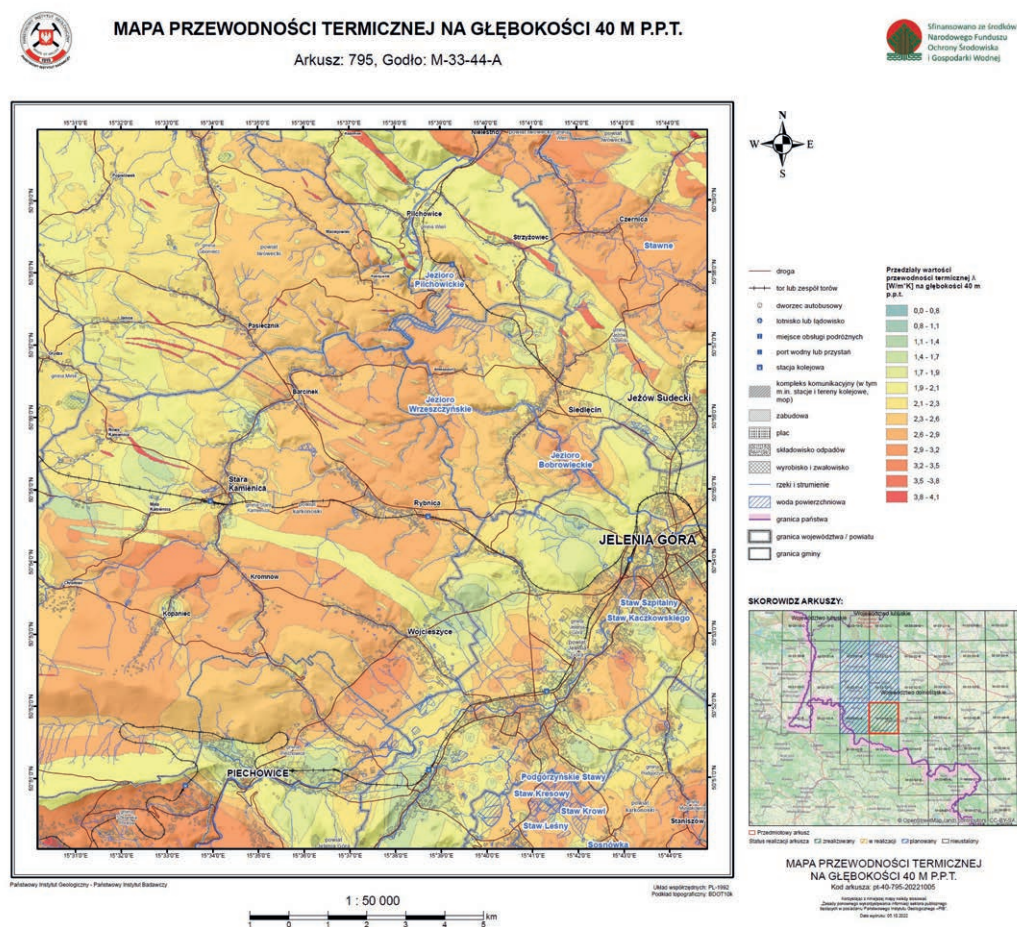
Typ mapy	Rodzaj warstwy	Numer klasy	Przedział wartości klasy [W/mK]	Kod RGB	Paleta kolorów
Średnia przewodność cieplna	Ciągła	1	0,0–0,8	116 171 173	
		2	0,8–1,1	145 186 161	
		3	1,1–1,4	172 201 147	
		4	1,4–1,7	198 217 132	
		5	1,7–1,9	227 235 117	
		6	1,9–2,1	250 250 100	
		7	2,1–2,3	252 222 086	
		8	2,3–2,6	252 190 073	
		9	2,6–2,9	252 160 061	
		10	2,9–3,2	250 128 047	
		11	3,2–3,5	245 099 037	
		12	3,5–3,8	240 067 029	
		13	3,8–4,1	232 021 021	
		14	4,1–4,4	182 031 014	
		15	>4,4	124 021 010	

najlepiej w gradiencie kolorów, od niebieskiego (dla wartości najniższych) przez kolor żółty (dla wartości średnich) aż po czerwony (dla wartości najwyższych) i zamieszcza w legendzie do mapy (przykład na rycinie 54)

Przekształcenia wynikowych rastrów ilościowych z obliczonymi wartościami przewodności termicznej w mapy potencjału z jakościowymi klasami tych wartości ukazanymi za pomocą palety kolorów można dokonać za pomocą narzędzi geoprzetwarzania GIS (np. w pakiecie ArcMap lub ArcPRO w grupie narzędzi

Spatial Analyst) i poprzez przyporządkowanie predefiniowanych klas oraz odpowiadających im wartości granicznych przewodności termicznej. Rekomendowane przedziały klas przewodności przedstawiono poniżej:

- słaba przewodność termiczna (średnia wartość λ do 1,5 W/m*K), kolor niebieski;
- średnia przewodność termiczna (średnia wartość λ od 1,5 do 2,3 W/m*K), kolor zielony;
- dobra (wysoka) przewodność termiczna (średnia wartość λ od 2,3 do 4,0 W/m*K), kolor żółty;



Ryc. 54. Fragment mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru pilotażowego Jelenia Góra opracowany w ramach projektu MPGN, przedstawiający średnie przewodności termiczne skal w W/(m*K) dla głębokości 0-40 m

- bardzo dobra (wysoka) przewodność termiczna (średnia wartość λ powyżej 4,0 W/m²K), kolor czerwony.

Przykład takiej kategorialnej mapy, przeznaczonej dla odbiorcy nie będącego specjalistą w zakresie geologii bądź technologii grunto- wych pomp ciepła, pokazano na rycinie 55.

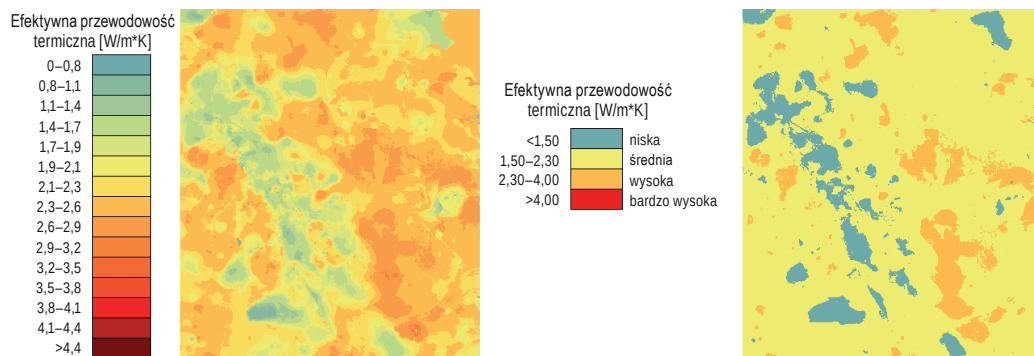
Standardowe dane wyjściowe dla wszystkich map mają format rastrów (plików ESRI GRID lub równoważnych) z lokalizacją i rozmiarem komórek obliczeniowych (ang. *cell size*) kompatybilnym z siatką bazową *mastergrid*. Wartość braku danych (tzw. NULL) określona jest przez arbitralnie przyjętą wartość liczbową wynoszącą - 9999. Dla każdego pliku wynikowego (rastra ESRI GRID) należy wypełnić tabelę metadanych z uwzględnieniem atrybutu obiektowego (poziom/przedział głębokości reprezentowany przez daną mapę – warstwę przestrzenną GIS).

Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej wykonuje się za pomocą standardowych procedur geoprzetwarzania w środowisku GIS (np. przeznaczonymi do tego nakładkami obliczeniowymi jak IE-Geothermie stosowanymi np. przez saksońską służbę geologiczną) lub za pomocą specjalnie napisanych algorytmów obliczeniowych wykorzystujących tzw. algebrę rastra (ang. *raster algebra*). Stos obliczeniowy rastrów ESRI GRID, przedstawiony

w załączniku 3, jest poddawany iteracyjnym obliczeniom algebraicznym w każdej komórce siatki bazowej *mastergrid*. Technologia obliczeniowa, ze względu na dużą liczbę komórek rastrów podlegających obliczeniom, musi być zoptymalizowana pod kątem czasu przeprowadzanych obliczeń. Rekomenduje się stosowanie języka programowania Python wyposażonego w bibliotekę NumPy oraz prowadzenie obliczeń na rastrach zachowanych do klasy „macierz”, a nie jako obiekty klasy „tabela”. Przykłady map potencjału geotermii niskotemperaturowej oraz uwarunkowań środowiskowych dla skal 1:10 000 i 1:50 000 zawiera załącznik 10.

Algorytm obliczeniowy dokonuje wyliczenia efektywnej przewodności termicznej w komórkach obliczeniowych modelu, a także pozwala na wyliczenie na jej podstawie za pomocą liniowych formuł obliczeniowych opisanych w rozdziale 1 wartości jednostkowego współczynnika mocy termicznej odpowiednio dla 1 800 i 2 100 godzin pracy instalacji.

Wynikowe mapy jednostkowej wydajności termicznej q_v [W/m] (dla obu wariantów pracy instalacji) opracowywane są na podstawie wykonanych iteracyjnie obliczeń, bazujących na wspomnianych empirycznych liniowych formułach obliczeniowych. Należy zaznaczyć, że w związku z tym wartości jednostkowej wydajności termicznej q_v [W/m] przedstawione na



Ryc. 55. Oryginalna mapa efektywnej przewodności termicznej skał podłoża (na głębokości 0–40 m) dla obszaru pilotażowego Warszawa (po lewej) i ta sama mapa właściwości termicznych po przeklasyfikowaniu wg czterech kategorii opisowych (po prawej)

mapach nie mogą być stosowane bezpośrednio do wymiarowania OWC.

Warstwą referencyjną do określania potencjału geotermii niskotemperaturowej jest „MPGN – mapa przewodności termicznej λ_{eff} [W/m*K]”. Powyższe informacje należy umieszczać w formie klauzuli informacyjnej przy publikowaniu wynikowych map potencjału geotermii niskotemperaturowej zarówno w postaci warstw informacyjnych na portalach mapowych GIS, jak i na zredagowanych arkuszach map w skalach 1:10 000 i 1:50 000 opracowanych w formie plików *.jpg bądź *.pdf.

Zautomatyzowana procedura obliczeniowa może prowadzić do wyników, które mogą lokal-

nie wyglądać „nienaturalnie”. W takich przypadkach, które mogą wystąpić np. na obszarach fliszowych, gdzie występują skonstrastowane z punktu widzenia przewodności termicznej serie geologiczno-termalne oddzielone stromymi uskoki oraz występują skomplikowane warunki hydrogeologiczne, należy dokonać lokalnej analizy poprawności wykonanej procedury obliczeniowej. Takie podejście pozwala na oddzielenie i poprawienie artefaktów obliczeniowych od „kontrowersyjnych”, ale uzasadnionych geologicznie i obliczeniowo kontrastów między sąsiadującymi wydzieleniami.

12. EKSPORT PLIKÓW WYNIKOWYCH I UDOSTĘPNIENIE MAP POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ NA PORTALU INTERNETOWYM

Utworzona i zmodyfikowana na potrzeby projektu otworowa bazy danych oraz wszystkie kompatybilne z GIS zapisy danych (dane punktowe, liniowe i powierzchniowe – poligony oraz siatki – rastry) powstałe podczas modelowania 3D należy zdeponować w bazie danych instytucji wykonujących i zamawiających model oraz w komórce informatycznej PIG-PIB (odpowiedzialnej za publikację danych na geoportalach PIG-PIB). Dzięki spełnieniu tej procedury dane te będą dostępne dla innych opracowań oraz w celu ich publikacji i aktualizacji.

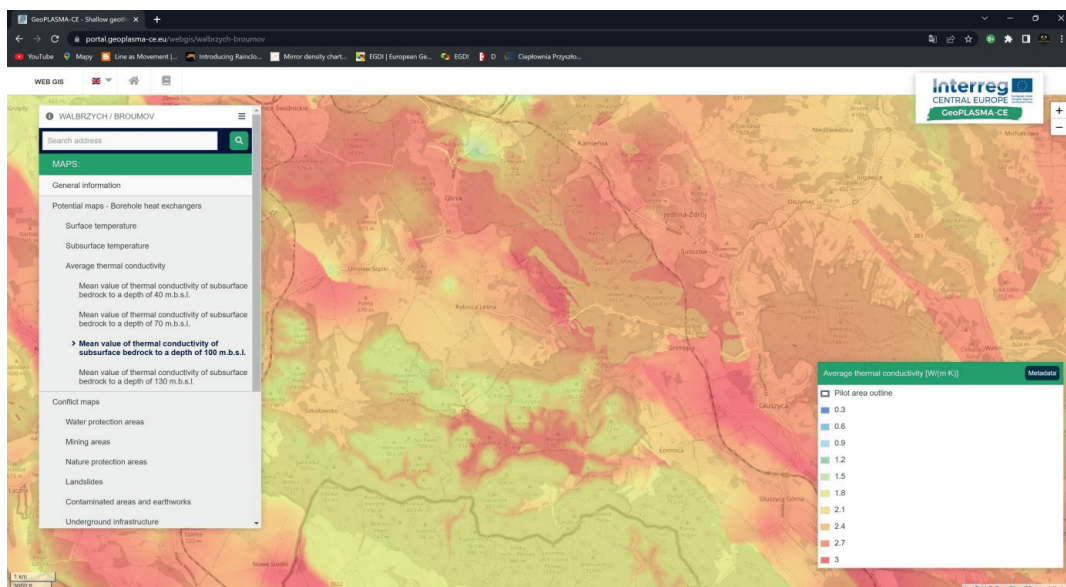
Dane serii geologiczno-termalnych oraz elementy składowe (powierzchnie, bryły) modelu 3D należy zapisać w formacie kompatybilnym z GoCAD, pozwalającym na ich import i interaktywną prezentację modelu za pomocą przeglądarki internetowej (np. z zastosowaniem przeglądarki GST firmy GiGa infosystems, wykorzystanej w ramach projektu TransGeoTherm, która umożliwia szybki dostęp i wymianę dużych ilości danych pomiędzy instytucjami tworzącymi jeden wspólny model przestrzenny). Przykładowy geoportal prezentujący dane pro-

jektu GeoPLASMA-CE (ryc. 56) można znaleźć pod adresem: <https://portal.geoplasma-ce.eu>.

Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej należy zapisywać jako pliki graficzne typu *.pdf, *.jpg i/lub pliki wektorowe *.shp, które umożliwią ich włączenie do geoportali zarządzanych przez PIG-PIB: <https://geologia.pgi.gov.pl> i <https://geolog.pgi.gov.pl> w kompozycji tematycznej „Geotermia”.

Na portalach PIG-PIB udostępniane są następujące warstwy:

- obszar map MPGN;
- skowidz map w skali 1:10 000 i skowidz map w skali 1:50 000;
- warstwy powstałe na podstawie:
 - ◊ danych zawartych w dokumentacjach znajdujących się w Narodowym Archiwum Geologicznym: lokalizacja otworowych wymienników ciepła (OWC), reprezentatywny profil otworowego wymiennika ciepła (OWC), obiekty z zainstalowanymi gruntowymi pompami ciepła (GPC), obszar lokalizacji obiektu z instalacją wykorzystującą geotermię niskotemperaturową;



Ryc. 56. Widok mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru transgranicznego Walbrzych/Broumov – średnia efektywna przewodność cieplna dla przedziału głębokości 0–100 m na geoportalu projektu INTERREG GeoPLASMA-CE

- ◊ analizy otworów z bazy danych CBDH zgodnie z wytycznymi PORT PC z 2013 r.: przewodność termiczna λ [W/m·K] do głębokości 100 m p.p.t.;
- ◊ analizy warunków środowiskowych: mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych;
- ◊ modelowania 3D: mapy przewodności termicznej λ [W/m·K] na głębokości 40, 70, 100, 130 m p.p.t.; mapy jednostkowej wydajności termicznej q_v [W/m] dla 1800 h pracy pompy ciepła w ciągu roku na głębokości 40, 70, 100, 130 m p.p.t.; mapy jednostkowej wydajności termicznej q_v [W/m] dla 2100 h pracy pompy ciepła w ciągu roku na głębokości 40, 70, 100, 130 m p.p.t.

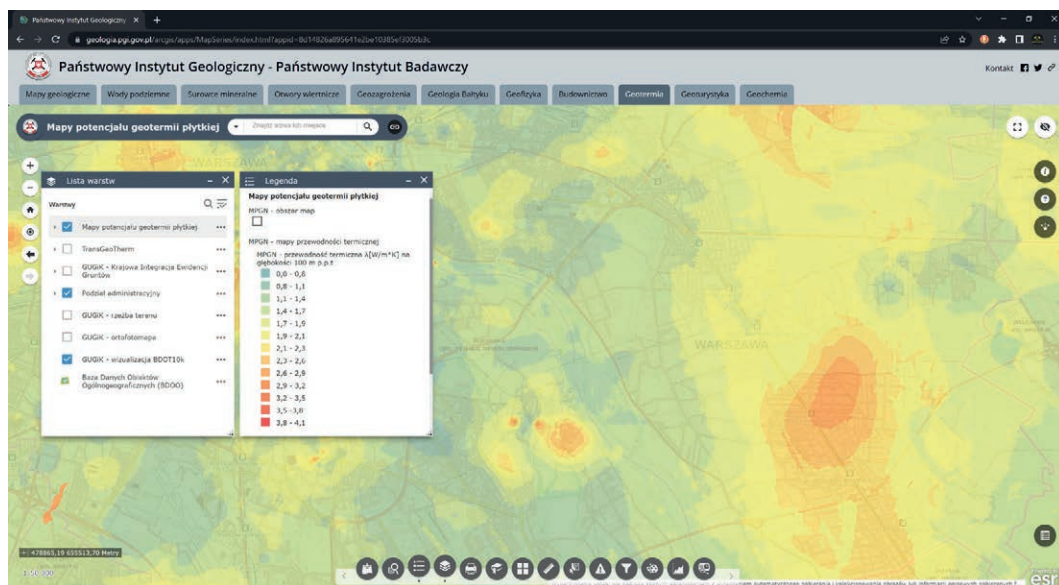
Aby dane (warstwy przestrzenne GIS i arkusze map w formacie *.pdf) mogły być umieszczone bezpośrednio na serwerach bazodanowych PIG-PIB (ryc. 57), muszą mieć zdefiniowaną strukturę, która szczegółowo została opisana w [załączniku 11](#). Dla części danych zostały za-

stosowane słowniki, które umożliwiają standaryzację opisu podobnych i powtarzających się informacji ([załącznik 12](#)). Ponadto, generując pliki pdf w poszczególnych arkuszach skorowidzu 1:10 000 i 1:50 000 dla obszarów objętych oceną potencjału geotermii niskotemperaturowej, należy stosować system tworzenia nazwy pliku zgodny z nazewnictwem kodowania z tabeli 11.

Nazwy plików arkuszy map składają się z następujących elementów (ryc. 58):

- kodu nazwy mapy np. pt (tab. 11);
- informacji o głębokości (nie dotyczy mapy możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych);
- godła arkusza mapy – w przypadku map w skali 1:10 000;
- numeru arkusza mapy – w przypadku map w skali 1:50 000;
- daty wydruku.

Na zielono zostały zaznaczone elementy, które występują w nazwie każdej mapy, zaś na czerwono elementy zmienne.

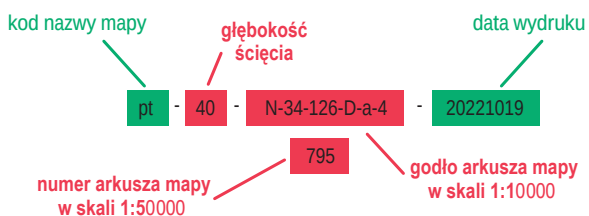


Ryc. 57. Widok mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej dla obszaru pilotażowego aglomeracji warszawskiej – średnia efektywna przewodność termiczna dla przedziału głębokości 0–100 m na geoportalu PIG-PIB (<https://geologia.pgi.gov.pl> – kompozycja tematyczna „GEOTERMIA”)

Tabela 11. Nazwy i kody kompozycji mapowych

Lp.	Nazwa mapy	Kod mapy
1	Mapa przewodności termicznej	pt
2	Mapa jednostkowej wydajności termicznej dla 1800 h pracy pompy ciepła w ciągu roku	qv1800
3	Mapa jednostkowej wydajności termicznej dla 2100 h pracy pompy ciepła w ciągu roku	qv2100
4	Mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych	mwo

Na publikowanych finalnie mapach oraz w ramach kompozycji warstw przestrzennych GIS publikowanych na geoportalach internetowych należy każdorazowo umieszczać aktualny na moment publikacji zestaw klauzul informacyjnych zgodnie z wzorem zaprezentowanym w przykładowych kompozycjach w załączniku nr 10.



Ryc. 58. Schemat obrazujący elementy składowe nazw plików mapowych

13. OPRACOWANIE MAP MOŻLIWOŚCI WYKONANIA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA Z UWZGLĘDNIENIEM UWARUNKOWAŃ ŚRODOWISKOWYCH

13.1. DEFINICJA MAPY

Mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych to mapa przedstawiająca 3 klasy obszarów, z podziałem czy istnieją przeciwskazania do wykonania otworowego wymiennika ciepła (OWC).

- **Do klasy I – instalacja bez przeciwskażeń** - należą obszary, na których nie zidentyfikowano przeciwskażeń do instalacji OWC
- **Do klasy II – instalacja warunkowa** - należą obszary w których zidentyfikowane czynniki należy szczegółowo przeanalizować w PRG i uwzględnić w projekcie technicznym OWC.
- **Do klasy III – instalacja z ewidentnymi przeciwskażeniami** – należą obszary, na których zidentyfikowane czynniki należy szczegółowo przeanalizować w PRG i uwzględnić je w projekcie technicznym OWC, ale mogą powodować brak możliwości wykonania OWC.

Czynniki środowiskowe należy rozumieć, jako grupę warunków związanych z elementami środowiska występującego na powierzchni terenu, takimi jak wody powierzchniowe, obszary chronione, ale też wybrane elementy zagospodarowania terenu.

Czynniki geologiczne to grupa warunków związanych z budową geologiczną obszaru, złożami i ich ochroną oraz warunkami hydrogeologicznymi.

Czynniki formalno-prawne to grupa warunków uwzględniających przepisy prawne odnoszące się do lokalizowania inwestycji OWC.

Uwarunkowania środowiskowe definiuje się, jako sklasyfikowanie wybranych warunków czynników środowiskowych, geologicznych i formalno-prawnych wg 3 klas możliwości wykonania OWC (instalacja bez przeciwskażeń, instalacja warunkowa, instalacja z przeciwskażeniami).

Podział czynników na warunki przedstawia tabela 12.

Mapa możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych ma charakter informacyjny, przedstawiający przyszłemu inwestorowi elementy, na jakie musi zwrócić uwagę przed planowaniem wykonania OWC. Świadomość istnienia uwarunkowań środowiskowych pomaga zarówno odbiorcom indywidualnym (inwestorom), wykonawcom oraz organom administracji geologicznej.

Jeśli na danym obszarze zostały zidentyfikowane warunki, dla których zdefiniowana klasa to III, to taki obszar też przynależy do klasy III. Klasę II stanowią obszary, na których zidentyfikowano warunki o klasie II, a klasę I stanowią obszary, na których nie zidentyfikowano wybranych warunków i tym samym nie zidentyfikowano przeciwskażeń do instalacji OWC.

Wykorzystywanie map możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych nie zwalnia z formalno-prawnego obowiązku wykonania projektu robót geologicznych wykonywanych w celu pozyskiwania ciepła Ziemi oraz powykonawczej dokumentacji geologicznej. Pełen obraz czynników mogących negatywnie oddziaływać na środowisko oraz potencjalnych konfliktów projektowanych otworowych wymienników ciepła (OWC) powinien zostać opracowany przez uprawnionego geologa projektującego i dokumentującego dolne źródło systemu gruntowych pomp ciepła. Poprawnie wykonany PRG pozwala na zminimalizowanie możliwych negatywnych konsekwencji niewłaściwie wykonanych instalacji OWC.

Należy zaznaczyć, że mapy możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych to przede wszystkim synteza warstw informacyjnych GIS, które są dostępne jako

Tabela 12. Podział czynników i warunków uwzględnionych w analizach GIS wykonywanych na potrzeby opracowania map możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła

CZYNNIKI		WARUNKI		UWAGI/ŹRÓDŁO DANYCH
1	środowiskowe	a	zasięg powodzi 100-letniej	Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie; ISOK https://isok.gov.pl
		b	parki narodowe	BDOT10k; https://mapy.geoportal.gov.pl
		c	rezerваты	BDOT10k; https://mapy.geoportal.gov.pl
		d	składowiska odpadów	GUGiK; BDOT10k https://mapy.geoportal.gov.pl
2	geologiczne	a	osuwiska	PIG-PIB; SOPO https://geologia.pgi.gov.pl
		b	podatność osuwiskowa	PIG-PIB; SOPO (System Osłony Przeciwosuwiskowej) https://geologia.pgi.gov.pl
		c	obszar zasobowy wód leczniczych	PIG-PIB; NAG - dokumentacje hydrogeologiczne ustalające zasoby dyspozycyjne wód leczniczych
		d	jaskinie	PIG-PIB; https://geologia.pgi.gov.pl
		e	obszary i tereny górnicze	PIG-PIB; System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych MIDAS
		f	złoża kopalin	PIG-PIB; System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych MIDAS
		g	istniejące instalacje gruntowych pomp ciepła	PIG-PIB; https://geologia.pgi.gov.pl
3	formalno-prawne	a	teren ochrony bezpośredniej ujęć wód podziemnych	RZGW (Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie) (Jeśli warstwa ma charakter punktowy bufor wokół punktu 10 m)
		b	teren ochrony pośredniej ujęć wód podziemnych	RZGW (Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie)
		c	strefa A ochrony uzdrowiskowej	PIG-PIB; https://spd.pgi.gov.pl/PSHv8/
		d	strefy B, C ochrony uzdrowiskowej	PIG-PIB; https://spd.pgi.gov.pl/PSHv8/

możliwie ciągle na terenie całego kraju zbiory danych przestrzennych. W związku z tym obraz i informacje prezentowane na mapach mogą nie w pełni oddawać lokalne uwarunkowania środowiskowe i, co za tym idzie – nie zastępują one szczegółowej, lokalnej analizy prowadzonej dla rozpatrywanej inwestycji (lokalizacji) na etapie projektowania robót geologicznych i sporządzania PRG.

PROJEKT ROBÓT GEOLOGICZNYCH DLA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Spośród powszechnie stosowanych dolnych źródeł ciepła w systemach zamkniętych (takich, w których czynnik roboczy krąży w układzie zamkniętym w systemie rur z tworzywa sztucz-

nego, bez kontaktu z otaczającym masywem skalno-gruntowym), jedynie wykonywanie otworowych wymienników ciepła o głębokości większej niż 30 m jest robotą geologiczną i jako taka podlega przepisom PGG. W przedziale głębokościowym od 30 do 100 m sporządzany jest projekt robót geologicznych, który jest zgłaszany odpowiednim miejscowo organom administracji geologicznej (Starostwo Powiatowe). Dla głębokości przekraczających 100 m konieczne jest dodatkowo wykonanie planu ruchu zakładu górniczego, który należy zatwierdzić w odpowiednim miejscowo Okręgowym Urzędzie Górniczym. W przypadku, kiedy planowane wiercenia pod otworowe wymienniki ciepła będą zlokalizowane na terenie górniczym, projekt robót geologicznych oraz plan ruchu należy

sporządzać w każdym przypadku, niezależnie od głębokości. W praktyce prowadzenie działań pod powierzchnią terenu, związane z pozyskiwaniem ciepła Ziemi, w strefie do głębokości 30 m poza obszarami górniczymi nie wymaga zgłaszania tych działań organom administracji geologicznej oraz nie podlega przepisom prawa geologicznego i górniczego.

Zawartość projektu robót geologicznych wykonywanych w celu pozyskiwania ciepła Ziemi określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji (Dz.U. 2023 poz. 155).

Projekt taki musi być sporządzony przez geologa posiadającego odpowiednie uprawnienia. W przypadku otworowych wymienników ciepła muszą to być kwalifikacje kategorii IV lub V. Projekt musi zawierać m.in. opis konstrukcji otworu, informacje dotyczące zamykania poziomów wodonośnych, opis budowy geologicznej, syntetyczny profil geologiczny w miejscu projektowanych odwiertów, opis i uzasadnienie przewidywanej liczby, lokalizacji i rodzaju projektowanych otworów, opis obszarów i obiektów chronionych, określenie wpływu zamierzonych robót geologicznych na obszary chronione, w tym Natura 2000. Określenie przewidywanej liczby i głębokości projektowanych odwiertów jest szacowane na podstawie przewidywanego profilu geologicznego projektowanych otworów wiertniczych oraz wielkości parametrów stosowanych do wymiarowania sond pionowych, przyjętych z danych literaturowych (np. monografii naukowych lub z wytycznych PORT PC). W przypadku instalacji o dużej mocy (powyżej 100 kW łącznej mocy grzewczej pomp ciepła wg wytycznych PORT PC) projekt powinien również zawierać informację o możliwej zmianie liczby projektowanych otworów, w zależności od wyników badania metodą testu reakcji termicznej (TRT) oraz wyników modelowania numerycznego.

Zgodnie z art 85, ust. 1. pkt. 1. ustawy PGG projekt robót geologicznych wykonywany w celu pozyskiwania ciepła Ziemi nie wymaga

zatwierdzenia. Rozpoczęcie robót geologicznych może nastąpić, jeżeli w terminie 30 dni od dnia przedłożenia projektu robót Starosta nie wniesie do niego sprzeciwu w drodze decyzji. Zgodnie z art. 85, ust. 3. pkt. 1 i 2 PGG może on zgłosić sprzeciw, jeżeli projekt nie odpowiada przepisom prawa (tj. jego zawartość nie odpowiada wytycznym Rozporządzenia w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych), a także jeżeli sposób wykonania zamierzonych robót zagraża środowisku. W praktyce, wniesienie sprzeciwu do projektu robót geologicznych przez Starostę jest jedynym momentem, w którym organy administracji geologicznej mają możliwość wpływu na proces wykonywania odwiertów pod otworowe wymienniki ciepła. Przykładowo, zagrożenia środowiskowe mogą wystąpić w sytuacji, gdy roboty związane z odwierceniem otworowych wymienników ciepła zostały zaprojektowane w obrębie obszaru zasobowego ujęcia wód podziemnych i istnieje prawdopodobieństwo, że może to negatywnie oddziaływać na jakość ujmowanych wód. Sytuacja taka może wystąpić również wtedy, gdy roboty geologiczne planuje się prowadzić na obszarze górniczym, wyznaczonym w koncesji na wydobywanie wód leczniczych współwystępujących z wodami podziemnymi. Należy uwzględnić, że do wykonywania robót geologicznych na obszarze górniczym utworzonym w celu wykonywania działalności metodą robót podziemnych lub metodą otworów wiertniczych stosuje się przepisy dotyczące zakładu górniczego.

Podczas wykonywania OWC oraz jego eksploatacji mogą zaistnieć zagrożenia i problemy środowiskowe, do których należą:

- wyciek czynnika roboczego z systemu rur,
- zanieczyszczenie z terenu wiertni,
- utrata izolacji warstwy wodonośnej,
- połączenie różnych warstw wodonośnych,
- obecność warstw wodonośnych o poziomie artezyjskim,
- obecność w przewiercanych warstwach skał o właściwościach pęczniejących (iłów i anhydrytów).

Przedstawione problemy środowiskowe zostały scharakteryzowane szczegółowo w Instrukcji szkoleniowej dla projektantów płytkich systemów geotermalnych GEOTRAINET (2017), gdzie zostały szerzej objaśnione.

13.2. WYBÓR WARUNKÓW DO ANALIZY I ZEBRANIE DANYCH

Każdy warunek poddany analizie musi mieć przypisaną odpowiednią klasę możliwości wykonania OWC (instalacja bez przeciwskażeń (I), instalacja warunkowa (II), instalacja z przeciwskażeniami (III)).

Dla części warunków należących do grupy czynników środowiskowych i geologicznych mają zastosowanie przepisy w następujących ustawach:

- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2023 poz. 633 z późn. zm.).
- Ustawa a dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2022 poz. 2556), w skrócie POŚ.
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz.U. 2023 poz. 1336), w skrócie UOP.

Dla pozostałych warunków z grupy czynników środowiskowych i geologicznych nadane klasy stanowią ekspercką interpretację autorów i mogą służyć jedynie pomocniczo, na wstępnym etapie przygotowania do inwestycji. Szczegółowa analiza czynników powinna odbyć się na etapie przygotowania projektu robót geologicznych.

Warunki należące do grupy czynników formalno-prawnych można przypisać do odpowiedniej klasy na podstawie następujących przepisów prawa:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz.U. 2023 poz. 1478), w skrócie PW.
- Ustawa z dnia 28 lipca 2005 r. o lecznictwie uzdrowiskowym, uzdrowiskach i obszarach ochrony uzdrowiskowej oraz o gminach

uzdrowiskowych (Dz.U. 2023 poz. 151), w skrócie PU.

- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r Prawo budowlane (Dz.U. 2023 poz. 682), w skrócie PB.

Szczegółowe uzasadnienie klasyfikacji analizowanych warunków znajduje się w tabeli 13.

Wybrany zestaw warunków nie wyczerpuje wszystkich czynników, jakie mogą mieć wpływ na wykonanie i instalację GPC, natomiast daje przyszłemu inwestorowi wstępną informację o możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła.

W przypadku sporządzania mapy możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych należy też zwrócić uwagę, aby dane wejściowe były możliwie dostępne dla wszystkich obszarów projektu, ale lokalnie można analizować dodatkowe elementy (np. obszary zasobowe wód leczniczych, szczegółowe zapisy MPZP).

13.3. INTEGRACJA DANYCH

Integracja danych polega na takim zestawieniu zebranych warunków, aby możliwe było ich przetwarzanie w środowisku GIS i uzyskanie jednolitej mapy możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych.

Wszystkie czynniki powinny być przygotowane w formie osobnych warstw źródłowych typu shape, umożliwiających przetwarzanie w środowisku GIS. Każdy analizowany warunek powinien stanowić jedną warstwę o ustalonej nazwie i podanej strukturze (tab. 14), a wszystkie finalne warstwy powinny znajdować się w jednej specjalnie utworzonej geobazie projektu.

Nazwy warstw źródłowych powinny zostać ujednolicone i nadane zgodnie z tabelą 15.

Obszary, na których nie występują wybrane elementy uwarunkowań środowiskowych zostały uznane za obszary klasy I – instalacji bez przeciwskażeń i tworzą warstwę mpgn_klasa1. Pozostałe warstwy, zgodnie z opisem i nadaną klasyfikacją tworzą pozostałe klasy obszarów.

Tabela 13. Klasyfikacja warunków do wykonania analizy przestrzennej możliwości wykonania OWC

CZYNNIKI	WARUNKI		KLASA
	a	UZASADNIENIE – ograniczenia związane z aktami prawnymi	
1	a	Brak formalnego zakazu wykonywania OWC, warstwa informacyjna wymagająca przeanalizowania w PRG.	II
	b	Art. 15 UOP wymienia zakazy, jakie występują na obszarze parków narodowych, wśród nich w wymienia się m.in. budowy lub przebudowy obiektów budowlanych i urządzeń technicznych z wyjątkiem obiektów i urządzeń służących celom parku narodowego albo rezerwatu przyrody. Instalacja gruntowej pompy ciepła może podlegać pod budowę instalacji technicznych ale jednocześnie art. 15 pkt. 3 wskazuje, że minister właściwy do spraw środowiska, po zasięgnięciu opinii dyrektora parku narodowego może zezwolić na obszarze parku narodowego na odstąpieniu od zakazów jeżeli jest to uzasadnione: 1) potrzebą ochrony przyrody, wykonywaniem badań naukowych, celami edukacyjnymi, kulturowymi, turystycznymi, rekreacyjnymi lub sportowymi lub celami kultu religijnego i nie spowoduje to negatywnego oddziaływania na przyrodę parku narodowego lub 2) potrzebą realizacji inwestycji liniowych celu publicznego lub potrzebą realizacji celu publicznego z zakresu łączności publicznej o nieliniowym charakterze w celu związanym z zapewnieniem telekomunikacji na obszarze parku narodowego, w przypadku braku rozwiązań alternatywnych i po zagwarantowaniu kompensacji przyrodniczej. Wykonanie instalacji GPC może więc spełniać przesłankę potrzeby ochrony środowiska w przypadku gdy zastępuje dotychczasowy sposób ogrzewania (np. piece węglowe), ale wymaga to zdobycia dodatkowych informacji.	II
	c	Zgodnie z UOP rezerwat obejmuje obszary zachowane w stanie naturalnym lub mało zmienionym, ekosystemy, ostoje i siedliska przyrodnicze, a także siedliska roślin, siedliska zwierząt i siedliska grzybów oraz twory i składniki przyrody nieożywionej, wyróżniające się szczególnymi wartościami przyrodniczymi, naukowymi, kulturowymi lub walorami krajobrazowymi. Na obszarze rezerwatu występują te same zakazy, co na obszarze parku narodowego czyli m.in. budowy lub przebudowy obiektów budowlanych i urządzeń technicznych z wyjątkiem obiektów i urządzeń służących celom parku narodowego albo rezerwatu przyrody. Także na obszarze rezerwatu dopuszczalne jest odstąpienie od zakazów przez Generalnego Dyrektora Ochrony Środowiska, po zasięgnięciu opinii regionalnego dyrektora ochrony środowiska, jeżeli jest to uzasadnione potrzebą: 1) ochrony przyrody lub 2) realizacji inwestycji liniowych celu publicznego lub realizacji inwestycji celu publicznego z zakresu łączności publicznej o nieliniowym charakterze w celu związanym z zapewnieniem telekomunikacji na obszarze rezerwatu przyrody, w przypadku braku rozwiązań alternatywnych i po zagwarantowaniu kompensacji przyrodniczej.	III
2	d	Brak formalnego zakazu wykonywania OWC, warstwa informacyjna wymagająca przeanalizowania w PRG.	III
	a	Observację terenów zagrożonych ruchami masowymi ziemi oraz terenów, na których występują te ruchy prowadzi Starosta - art. 110a POŚ. Przy instalacji pomp ciepła, o mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 50 kW nie wymaga decyzji o pozwoleniu na budowę oraz zgłoszenia - art 29 ust 4 pkt 3c PB.	III
	b	W projekcie MPGN zdecydowano się wziąć pod uwagę obszary, które według Mapy Podatności Osuwiskowej (Wojciechowski, 2019) przypisano do 4 (dużej) i 5 (bardzo dużej) klasy podatności osuwiskowej. Mapa ta stanowi wynik obliczeń wystąpienia prawdopodobieństwa osuwiska na obszarze Polski. Do wykonania Mapy Podatności osuwiskowej bierze się pod uwagę czynniki bierne takie jak: litostratygrafia, odległość od uskoków, spadki terenu, ekspozycja stoku, wysokość n.p.m., odległość od cieków i zbiorników wodnych, pokrycie terenu oraz sumę opadów (potraktowane jako czynnik bierny), które zostały analizowane metodami statystycznymi w siatce obliczeniowej 50x50 m. Podatność osuwiskowa została podzielona na 5 przedziałów, od podatności nieistotnej (klasa 1) do bardzo dużej (klasa 5). Mapa Podatności Osuwiskowej ma charakter informacyjny.	II

Tab. 13. cd.

CZYNNIKI		WARUNKI	UZASADNIENIE – ograniczenia związane z aktami prawnymi	KLASA
2	c	obszar zasobowy wód leczniczych	Obszar zasobowy ujęcia wód leczniczych to fragment zbiornika wód podziemnych, wyznaczony z uwzględnieniem kryteriów strukturalnych wynikających z budowy geologicznej, w obrębie którego formuje się co najmniej połowa zasobów eksploatacyjnych ujęcia. Ochrona tych obszarów jest bardzo istotna ze względu na zachowanie jakości wód leczniczych, mimo że wykonywanie otworowych wymienników ciepła nie wpływa na zasoby eksploatacyjne tych wód. Przypisanie obszarów zasobowych ujęć wód leczniczych do trzeciej klasy ograniczeń pozwoli na wyeliminowanie ewentualnych możliwych konsekwencji niepoprawnego wykonania instalacji OWC (brak izolacji poziomów wodonośnych, zmiana krążenia dwutlenku węgla, odgazowania złożeń).	III
		d	Brak formalnego zakazu wykonywania OWC, warstwa informacyjna wymagająca przeanalizowania w PRG.	III
		e	Według PGG obszar górniczy (OG) to przestrzeń, w granicach której przedsiębiorca jest uprawniony do wydobywania kopaliny, podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, podziemnego składowania odpadów, podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz prowadzenia robót górniczych niezbędnych do wykonywania koncepcji. Teren górniczy (TG) to przestrzeń objęta przewidywanymi szkodliwymi wpływami robót górniczych zakładu górniczego. PGG nie określa zakazów ani innych ograniczeń w użytkowaniu OG i TG, ale należy pamiętać, że w przypadku wykonywania otworów na OG utworzonym w celu wykonywania działalności metodą robót podziemnych albo metodą otworów wiertniczych, stosuje się przepisy dotyczące zakładu górniczego i jego ruchu oraz ratownictwa górniczego. Należy pamiętać, że OG i TG są także wyznaczone dla eksploatowanych wód leczniczych lub termalnych, czyli kopalin, które są szczególnie wrażliwe na wykonywanie otworów wiertniczych.	II
		f	Obecność instalacji GPC nie może stać w sprzeczności z racjonalnym gospodarowaniem zasobami oraz kompleksowym wykorzystaniu kopalini – art. 125 POŚ.	II
	g	istniejące instalacje gruntowych pomp ciepła	Warstwa zawiera informacje o istniejących zainstalowanych OWC dla systemów gruntowych pomp ciepła pochodzące z dokumentacji geologicznych zgromadzonych w NAG. Warstwa ma charakter informacyjny. Należy ją brać pod uwagę na etapie sporządzania PRG. Warstwa obejmuje bufor 10 m dookoła istniejących OWC. Przydzielenie III klasy przeciwwskażeń wynika z możliwości potencjalnej kolizji nowoprojektowanych OWC z już istniejącymi OWC, a co za tym idzie potencjalnym ryzyku wycieku czynnika roboczego i potencjalnym zagrożeniu dla środowiska i warstw wodonośnych.	III
3	a	teren ochrony bezpośredniej ujęć wód podziemnych	Zgodnie z art. 127 PW na terenie ochrony bezpośredniej wód zakazuje się użytkowania gruntów do celów niezwiązanych z eksploatacją ujęcia wody, co uniemożliwia wykonanie otworów wiertniczych i instalacji OWC.	III
	b	teren ochrony pośredniej ujęć wód podziemnych	Na terenie ochrony pośredniej ujęcia wód może być zakazane lub ograniczone wykonywanie robót lub czynności powodujących zmniejszenie przydatności ujmowanej wody lub wydajności ujęcia, za które mogą być uznane instalacje gruntowych pomp ciepła. Gruntowe pompy ciepła nie zostały jednak wymienione wprost w art. 130 PW.	II
	c	strefa A ochrony uzdrowskiej	Dla strefy A zgodnie z art. 38a pkt 1. PU zabrania się m.in. pozyskiwania surowców mineralnych innych niż naturalne surowce lecznicze; prowadzenia robót melioracyjnych i innych działań powodujących niekorzystną zmianę stosunków wodnych, prowadzenia działań mających negatywny wpływ na fizjografię uzdrowiska i jego układ urbanistyczny lub właściwości lecznicze klimatu.	III
	d	Strefy B, C ochrony uzdrowskiej	Dla strefy B i C zgodnie z art. 38a pkt 1. PU zabrania się prowadzenia robót melioracyjnych i innych działań powodujących niekorzystną zmianę stosunków wodnych	II

Tabela 14. Struktura tabeli atrybutów warstw wektorowych

Pole	Alias	Opis	Opis_en	Typ pola	Uwagi
KLASA_OB	klasa obiektu	Klasa możliwości wykonania instalacji OWC	possibility class of BHE installation	SHORT INT	Wartości: 1,2,3
KLASA_OPIS	opis klasy	Opis klasy	class description	TEXT 50	np. instalacja bez przeciwwskazań
BAZA_ZR	baza źródłowa	Źródło danych	data source	TEXT 50	Symbol bazy (CBDH); pełna nazwa w polu uwagi
OBIEKT_ID	ID obiektu	Kod obiektu bazy źródłowej	source database object code	TEXT 20	np. 4050001
OBIEKT_NAZ	nazwa obiektu	Nazwa obiektu	object name	TEXT 150	np. Rezerwat przyrody
UWAGI	uwagi	Uwagi	remarks	TEXT 254	np. CBDH

Tabela 15. Proponowane nazewnictwo warstw źródłowych w projekcie MPGN

CZYNNIKI		WARUNKI		NAZWA WARSTWY W GEOBAZIE
1	środowiskowe	a	zasięg powodzi 100-letniej	mpgn_zr_pow100lat
		b	parki narodowe	mpgn_zr_pn
		c	rezerваты	mpgn_zr_rez
		d	składowiska odpadów	mpgn_zr_skladow
2	geologiczne	a	osuwiska	mpgn_osuw
		b	podatność osuwiskowa	mpgn_zr_pod_osuw
		c	obszar zasobowy wód leczniczych	mpgn_zr_ozw_lecz
		d	jaskinie	mpgn_zr_jaskinie
		e	obszary i tereny górnicze	mpgn_zr_terob_grn
		f	złoża kopalin	mpgn_zr_zloza
		g	istniejące instalacje gruntowych pomp ciepła	mpgn_zr_gpc_otw
3	formalno-prawne	a	teren ochrony bezpośredniej ujęć wód podziemnych	mpgn_zr_sow_bezp
		b	teren ochrony pośredniej ujęć wód podziemnych	mpgn_zr_sow_pos
		c	strefa A ochrony uzdrowiskowej	mpgn_zr_uzdrA
		d	Strefy B, C ochrony uzdrowiskowej	mpgn_zr_uzdrBC

13.4. PRZYGOTOWANIE MAPY MOŻLIWOŚCI WYKONANIA OWC

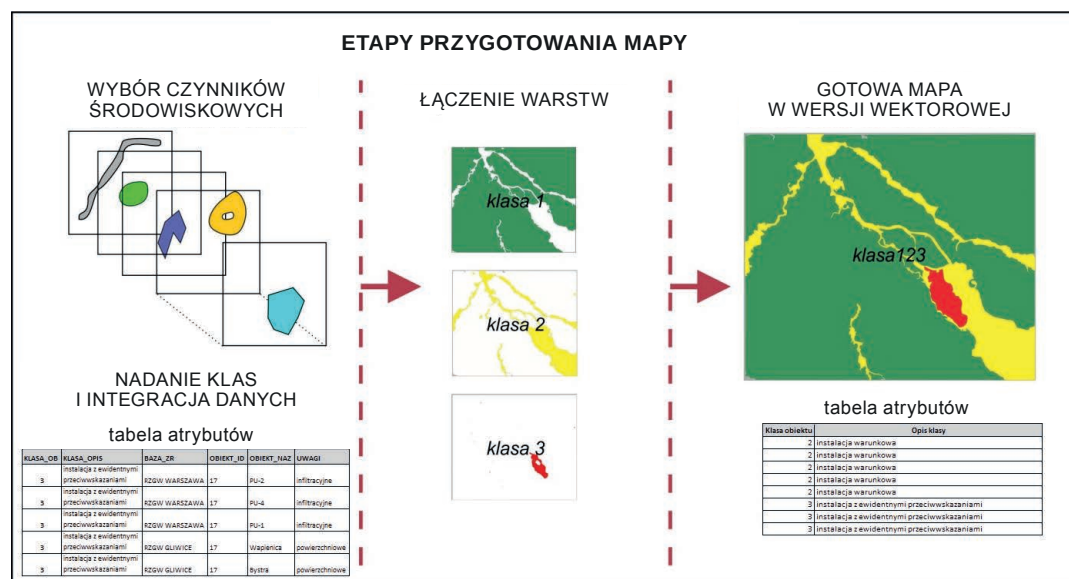
Schemat prac nad sporządzaniem Mapy możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych przedstawiono na rycinie 59. Poniżej przedstawiono etapy przygotowania warstwy wynikowej dla mapy możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych:

1. łączenie warstw o przydzielonych klasach (klasy I–III) możliwości instalacji OWC;
2. wycinanie obszarów zgodnie z superpozycją klas (w przypadku, gdy na danym obszarze nakładają się obiekty o klasie 2 lub 3, obszar taki otrzymuje klasę 3);

3. łączenie obszarów w warstwę wynikową reprezentującą 3 klasy możliwości instalacji OWC – warstwa *klasa123*;

4. przygotowanie warstwy wynikowej mpgn_mwyk_OWC – warstwy informacyjnej GIS będącej podstawą do publikacji map możliwości wykonania otworowych wymienników ciepła z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych na portalu internetowym (ryc. 60).

Na publikowanych finalnie mapach oraz w ramach kompozycji warstw przestrzennych GIS publikowanych na geoportalach internetowych należy każdorazowo umieszczać aktualny na moment publikacji zestaw klauzul informacyjnych zgodnie z wzorem zaprezentowanym w przykładowych kompozycjach w załączniku nr 10.



Ryc. 59. Schemat prac nad sporządzeniem mapy możliwości wykonania OWC z uwzględnieniem uwarunkowań środowiskowych

LITERATURA

- BESTYŃSKI Z., 1997 – Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych. Kraków, Archiwum AGH [pr. doktor.].
- BESTYŃSKI Z., THIEL K., ZABUSKI L., 1989 – Geotechniczna klasyfikacja maszyn fliszowych. Gdańsk. Rozprawy Hydrotechniczne, 52. IBW PAN.
- DAHLIN T., ZHOU B., 2004 – A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.*, 52 (5): 379–398.
- GALAŹKA D., GASTOŁ-PALECHOWSKA B., MARKS L., NAUWALDT E., STAŃCZAK Z., 2009 – Instrukcja reambulacji Mały geologicznej Polski w skali 1:200 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- GARDNER G.H.F., GARDNER L.W., GREGORY A.R., 1974 – Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39: 770–780. DOI:10.1190/1.1440465.
- GÖRZ I., HEIERMANN M., GÖTZL G., STEINER C., CIAPALA B., HOFMANN K., & the GeoPLASMA-CE team 2019 – Wytyczne GeoPLASMA CE (Evaluated Guidelines on Harmonized Workflows and Methods for Urban and Non-Urban Areas).
- HERBICH P., Zespół Koordynacyjny MHP, 2007, aktualizacja 2015 – Udostępnianie, weryfikacja, aktualizacja i rozwój Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1: 50 000. Program prac i szczegółowe wskazania metodyczne do opracowania warstw informacyjnych bazy GIS Mapy hydrogeologicznej Polski „Pierwszy poziom wodonośny występowanie i hydrodynamika”. Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowa Służba Hydrogeologiczna, Warszawa.
- KAPUŚCIŃSKI J., RODZICH A., 2010 – Geoterminia niskotemperaturowa w Polsce i na świecie. Stan aktualny i perspektywy rozwoju. Uwarunkowania techniczne, środowiskowe i ekonomiczne. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- KELER G.V., FRISCHKNECHT F.C., 1966 – Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford.
- KĘPIŃSKA B., 2018 – Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej w Polsce w latach 2016–2018. *Tech. Poszuk. Geol. Geot. Zrówn. Rozw.*, 57 (1): 11–27.
- KĘPIŃSKA B., 2019 – Geothermal Energy Use, Country Update for Poland, 2016–2018. Proceedings of European Geothermal Congress 2019 Den Haag.
- KĘPIŃSKA B., 2021 – Wykorzystanie energii geotermalnej w Polsce w latach 2019–2021. *Prz. Geol.*, 69 (9): 559–565.
- KOŚLACZ R., KRAWCZYK J. wraz z zesp., 2014 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych w obszarach bilansowych współwystępujących wód leczniczych i zwykłych wód podziemnych w wydzielonym rejonie Karpat – zlewnia Popradu. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- KOZDRÓJ W., KŁONOWSKI M., 2014 – TransGeoTherm. Energia geotermalna dla transgranicznego rozwoju regionu Nysy – Projekt pilotażowy. Broszura informacyjna na temat stosowania płytkiej geotermii. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy we współpracy z Landesamt Für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen, Wrocław .
- LACHMAN P., 2019 – Raport rynkowy PORT PC. Port PC, Kraków.
- LACHMAN P., RĄCZKA J., SCHNELL CH., WRÓBEL P., 2020 – Scenariusze elektryfikacji ogrzewania w budynkach jednorodzinnych w Polsce do 2030 roku, Raport rynkowy PORT PC: 2020, Rynek pomp ciepła w Polsce w latach 2010–2019, Perspektywy rozwoju rynku pomp ciepła do 2030 roku. PORT PC, Kraków, 70pp.
- LOKE M.H., BARKER R.D., 1996 – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prospect.*, 44 (1): 131–152.
- LOKE M.H., 2004 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. www.ualberta.ca.
- LOKE M.H., ALFOUZAN F.A., NAWAWI M.N.M., 2007 – Optimisation of electrode arrays used in 2D resistivity imaging surveys. *ASEG Extended abstracts 2007* (1): 1–4.
- ŁUKAWSKA A., RYŻYŃSKI G., ŻERUŃ M., 2020 – Serial Laboratory Effective Thermal Conductivity Measurements of Cohesive and Non-cohesive Soils for the Purpose of Shallow Geothermal Potential Mapping and Databases – Methodology and Testing Procedure Recommendations. *Energies*, 13, 914.

- ŁUKAWSKA A., ŻERUŃ M., RYŻYŃSKI G., 2021 – Wpływ wilgotności gruntów mineralnych na wartość efektywnej przewodności termicznej na podstawie wyników pomiarów laboratoryjnych. *Prz. Geol.*, 69(9): 604–610.
- MACUDA J., 2010 – Środowiskowe aspekty produkcji gazu ziemnego z niekonwencjonalnych złóż. *Prz. Geol.*, 58(3): 266–270.
- MACUDA J., ZAWISZA L., 2006 – Techniczne uwarunkowania składowania odpadów płynnych w górotworze metodą otworową. *Wiertnictwo Nafta Gaz.*, 23/1: 333–340.
- MAJER E., SOKOŁOWSKA M., FRANKOWSKI Z. (red.), BARAŃSKI M., BESTYŃSKI Z., OSTROWSKI S., PASIECZNA A., PIETRZYKOWSKI P., PRZYŁUCKA M., BŁACHNIO O., CHADA M., CZARNIAK P., DZIEKAN-KAMIŃSKA E., JAROS M., JUDKOWIAK M., ŁUKAWSKA A., MAJER K., PACANOWSKI G., PIECHOTA A., ROGUSKI A., RYŻYŃSKI G., SAMEL I., SOKOŁOWSKI J., SZABŁOWSKA M., SZLASA M., 2018 – Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (w świetle wymagań Eurokodu 7). PIG-PIB, Warszawa.
- OFICJALSKA H. wraz z zesp., 2009 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód leczniczych Rabki-Zdroju. *Narod. Arch. Geol.* PIG-PIB, Warszawa.
- OSTROWSKI O., PACANOWSKI G., MAJER E., SOKOŁOWSKA M. (red.), CZARNIAK P., PIECHOTA A., BARAŃSKI M., SZABŁOWSKA M., LASOCKI M., WILKOŁAZKI P., MAJER K., 2023 – Badania geologiczno-inżynierskie – Geofizyka Inżynierska PIG-PIB, Warszawa.
- Plewa S. 1994 – Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski. Wydaw. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- PORT PC, 2013 – Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła. Część 1. Dolne źródła do pomp ciepła. PORT PC Kraków.
- PORT PC, 2014 – Poradnik inwestora. Energia Geotermalna i pompy ciepła. Informacje i porady dla początkujących. PORT PC, Kraków.
- PORT PC, 2021 – Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła Część 1 Dolne źródła do pomp ciepła. PORT PC, Kraków.
- RUBIK M., 2011 – Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej. Ofic. Wyd. Multico, Warszawa.
- RYŻYŃSKI G., MAJER E., 2015 – Geotermia niskotemperaturowa – informacja geologiczna i procedury prawne. *Prz. Geol.*, 63(12/1): 1388–1396.
- SANNER B., 2019 – Summary of EGC 2019 Country Update Reports on Geothermal Energy In Europe, *Proceedings of European Geothermal Congress 2019 Den Haag*.
- SHEEHAN J.R., DOLL W.E., MANDELL W.A., 2005 – An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10(1), 21–34.
- TROJAN J., 1975 – Metody geofizyczne w badaniach podłoża budowli wodnych. *Archiwum Hydrotechniki IBW PAN*, 22(2).
- WATANABE T., MATSUOKA T., ASHIDA Y., 1999 – Seismic travelttime tomography using Fresnel volume approach. *SEG Expanded Abstracts* 18, 1402–1405.
- WOJCIECHOWSKI T., 2019 – Podatność osuwiskowa Polski. *Prz. Geol.*, 67(5): 320–325.
- WÓJCICKI A., NAGY S., 2014 – Aspekty prawne i merytoryczne związane z bezpieczeństwem składowania CO₂ w strukturach geologicznych. *Energetyka*, 1: 33–37.

Normy i instrukcje

- ASTM D5334-22 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
- INSTRUKCJA szkoleniowa GeoTrainet dla projektantów płytkich systemów geotermalnych, podręcznik, projekt GeoTrainet – 2017.
- KD2 Pro 2008–2012 Thermal Properties Analyzer Operator's Manual version 12, Decagon Devices
- PB-102/CBGS Właściwości termiczne gruntów spoistych
- PB-103/CBGS Właściwości termiczne gruntów niespoistych
- PN-EN ISO 14689:2018-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Oznaczanie, opis i klasyfikowanie skał
- PN-EN ISO 17628:2015-09 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania geotermalne – Określenie przewodności cieplnej skał i gruntów przy zastosowaniu wymiennika ciepła w otworze wiertniczym
- Tempos 2018–2021 Thermal Properties Analyzer Operator's Manual, METER Group
- TK04 2019 Thermal Conductivity Meter User's Manual Version 5.5, TeKa, Berlin, Germany

Akty prawne i inne dokumenty

- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych,

- w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji (Dz.U. 2023 poz. 155)
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie innych dokumentacji geologicznych (Dz.U. 2020 poz. 2449).
- USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2023 poz. 633 z późn. zm.)
- USTAWA a dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (POŚ) (Dz.U. 2022 poz. 2556)
- USTAWA z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz.U. 2023 poz. 1336)
- USTAWA z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz.U. 2023 poz. 1478)
- USTAWA z dnia 28 lipca 2005 r. o lecznictwie uzdrowiskowym, uzdrowiskach i obszarach ochrony uzdrowiskowej oraz o gminach uzdrowiskowych (Dz.U. 2023 poz. 151)
- USTAWA z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. 2023 poz. 682)
- USTAWA z dnia 27 marca 2003 o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. 2023 poz. 977 z późn. zm.)

Instrukcja wykonywania map potencjału i uwarunkowań środowiskowych geotermii niskotemperaturowej jest pierwszym w Polsce podejściem do problematyki opracowywania Map Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej (MPGN). Mapy te ukazują zróżnicowanie obszarów pod względem zasobów energii cieplnej w podłożu gruntowym i skalnym oraz przedstawiają miejsca występowania możliwych konfliktów geo-środowiskowych, które mogą być przeciwwskazaniem do wykonywania otworowych wymienników ciepła. Mapy tego typu znajdują zastosowanie m.in. do projektowania indywidualnych instalacji GPC. Mogą być również wykorzystywane do określania, np. przez władze lokalne, w jakim stopniu płytka geotermia może zaspokoić zapotrzebowanie na energię ciepłą danego regionu lub aglomeracji miejskiej. Mapy Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej mogą przyczynić się do wzrostu wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) w Polsce. OZE to z kolei jeden z kluczowych elementów w nadchodzącej transformacji energetycznej. Niniejszy dokument w miarę realizacji kolejnych etapów i arkuszy MPGN, jako ciągłego zadania państwowej służby geologicznej, będzie sukcesywnie aktualizowany wraz z postępem prac oraz ciągłym udoskonalaniem i optymalizowaniem metodyki prac kartografii cyfrowej GIS.

Publikacja jest udostępniona na stronie internetowej https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/publikacje



**Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy**

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa
tel. (+48) 22 45 92 000, biuro@pgi.gov.pl

pgi.gov.pl

ISBN 978-83-67567-40-4



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Sfinansowano ze środków
**NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**