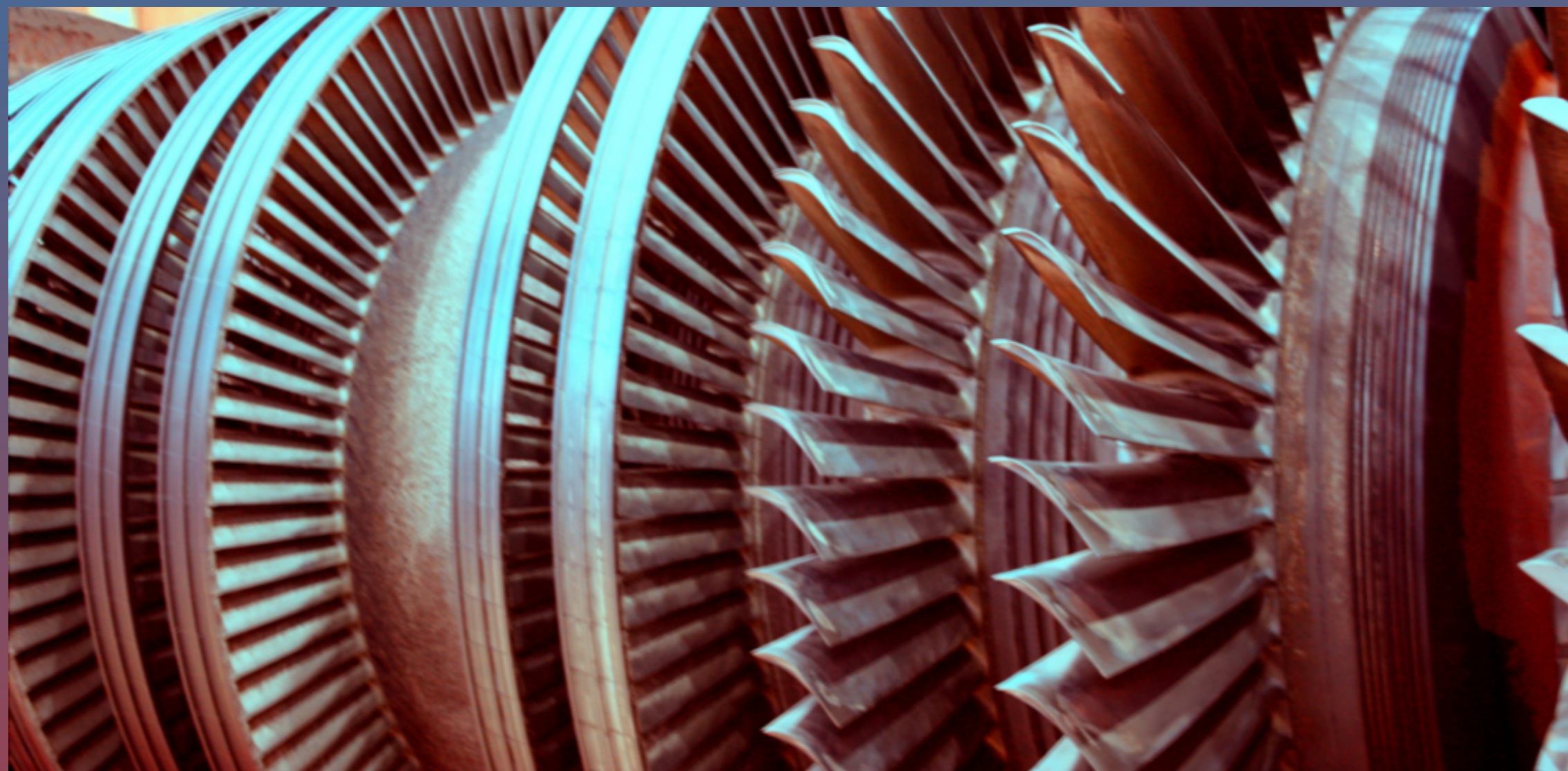


# ATLAS WYKORZYSTANIA WÓD TERMALNYCH DO SKOJARZONEJ PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPLNEJ W UKŁADACH BINARNYCH W POLSCE

ATLAS OF THE POSSIBLE USE OF GEOTHERMAL WATERS  
FOR COMBINED PRODUCTION OF ELECTRICITY AND HEAT  
USING BINARY SYSTEMS IN POLAND



*Redakcja naukowa:*

*Wiesław Bujakowski  
Barbara Tomaszewska*



# ATLAS WYKORZYSTANIA WÓD TERMALNYCH DO SKOJARZONEJ PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPLNEJ PRZY ZASTOSOWANIU UKŁADÓW BINARNYCH W POLSCE

*Monografia*

Redakcja naukowa: Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska

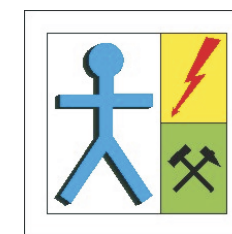
## ATLAS OF THE POSSIBLE USE OF GEOTHERMAL WATERS FOR COMBINED PRODUCTION OF ELECTRICITY AND HEAT USING BINARY SYSTEMS IN POLAND

*Monograph*

Scientific editors: Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska

Wykonano na zamówienie Ministerstwa Środowiska za środki finansowe wypłacone przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Made to order of Minister for the Environment the funds paid by the National Fund for Environmental Protection and Water Management



Kraków 2014



**Wykonawca**

***Konsorcjum Naukowe:***

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią  
Polskiej Akademii Nauk – Lider  
Zakład Odnawialnych Źródeł Energii i Badań Środowiskowych  
Pracownia Odnawialnych Źródeł Energii  
ul. Wybickiego 7  
31-261 Kraków  
tel. +48 12 632 67 17

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska  
Katedra Surowców Energetycznych  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
tel. +48 12 617 23 60

Państwowy Instytut Geologiczny –  
Państwowy Instytut Badawczy  
Oddział Karpacki im. M. Książkiewicza  
ul. Skrzatów 1  
31-560 Kraków  
tel. +48 12 290 13 40

**Redakcja Naukowa:**

dr inż. Wiesław Bujakowski  
dr hab. inż. Barbara Tomaszewska

**Recenzenci:**

Prof. dr hab. inż. Andrzej Szczepański – Recenzent naukowy  
mgr Jacek Kapuściński – Recenzent Komisji Dokumentacji Hydrogeologicznych Ministerstwa Środowiska

**Autorzy:**

dr hab. inż. Antoni Barbacki<sup>1</sup>, dr inż. Bogusław Bielec<sup>1</sup>, dr hab. inż. Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur<sup>8</sup>, dr inż. Wiesław Bujakowski<sup>1</sup>, prof. dr hab. inż. Wojciech Ciężkowski<sup>4</sup>,  
dr hab. inż. Józef Chowaniec<sup>3</sup>, mgr inż. Barbara Czerwińska<sup>6</sup>, dr hab. inż. Wojciech Franus<sup>5</sup>, mgr inż. Piotr Freiwald<sup>3</sup>, prof. dr hab. inż. Wojciech Górecki<sup>2</sup>, mgr inż. Marek Hajto<sup>2</sup>,  
mgr inż. Grażyna Hołojuch<sup>1</sup>, dr inż. Radomir Kaczmarek<sup>8</sup>, mgr Aleksandra Kasztelewicz<sup>1</sup>, dr hab. inż. Beata Kępińska<sup>1</sup>, dr inż. Tomasz Kujawa<sup>8</sup>, dr inż. Grzegorz Leśniak<sup>7</sup>,  
mgr inż. Roksana Mazurek<sup>8</sup>, mgr inż. Maciej Miecznik<sup>1</sup>, prof. dr hab. inż. Władysław Nowak<sup>8</sup>, mgr inż. Tomasz Operacz<sup>3</sup>, dr inż. Leszek Pająk<sup>1</sup>, dr inż. Bartosz Papiernik<sup>2</sup>,  
mgr Anna Przelaskowska<sup>7</sup>, dr Robert Skrzypczak<sup>1</sup>, dr inż. Anna Sowiżdżał<sup>2</sup>, dr hab. inż. Aleksander A. Stachel<sup>8</sup>, dr hab. inż. Barbara Tomaszewska<sup>1</sup>, dr inż. Sławomir Wiśniewski<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków  
<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
<sup>3</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki w Krakowie, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków  
<sup>4</sup> Politechnika Wrocławska, Instytut Górnictwa, Zakład Geologii i Wód Mineralnych, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
<sup>5</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin  
<sup>6</sup> Geofizyka Kraków SA, ul. Ignacego Łukasiewicza 3, 31-429 Kraków  
<sup>7</sup> Instytut Nafty i Gazu w Krakowie, ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków  
<sup>8</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Techniki Ciepłej, al. Piastów 16, 70-310 Szczecin

Zdjęcie na okładce: fragment turbiny z elektrowni binarnej Svartsengi na Islandii; Autor: Barbara Tomaszewska  
Projekt okładki i stron tytułowych: Aleksandra Kasztelewicz

Skład tekstu: Wydawnictwo „Jak”  
Druk i oprawa: Drukarnia „Patria”

© Wszelkie prawa zastrzeżone. Ministerstwo Środowiska  
Printed in Poland

Nakład: 200 egzemplarzy  
ISBN: 978-83-62922-33-8

# SPIS TREŚCI

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Wstęp</b> ( <i>Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 5  |
| Introduction .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 6  |
| <b>2. Przegląd warunków geologiczno-złożowych odpowiednich dla wykorzystywania wody termalnej w skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła</b> ( <i>Beata Kępińska</i> ) .....                                                                                                                                                     | 9  |
| 2.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 9  |
| 2.2. Europa – zarys warunków geotermalnych .....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 9  |
| 2.3. Warunki geologiczno-złożowe perspektywiczne dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła – przykłady .....                                                                                                                                                                                                                  | 9  |
| 2.3.1. Niemcy .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 9  |
| 2.3.2. Węgry .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 10 |
| 2.3.3. Słowacja .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 11 |
| 2.3.4. Rumunia .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 11 |
| Summary – Review of the geological and reservoir conditions required for the use of geothermal water in the combined production of heat and electricity .....                                                                                                                                                                               | 12 |
| <b>3. Przegląd technologii i elektrowni geotermalnych</b> ( <i>Aleksander A. Stachel, Wiesław Bujakowski, Leszek Pająk, Barbara Tomaszewska, Aleksandra Kasztelewicz, Radomir Kaczmarek, Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Roksana Mazurek</i> ) .....                                                                                        | 13 |
| 3.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 13 |
| 3.2. Stosowane rozwiązania techniczne .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 13 |
| 3.2.1. Podstawy budowy układów ORC .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 14 |
| 3.2.2. Podstawy budowy systemu Kaliny .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 16 |
| 3.2.3. Porównanie układów technologicznych ORC i Kaliny .....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 16 |
| 3.3. Binarne elektrownie geotermalne – przegląd doświadczeń .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 18 |
| Summary – Review of technologies and geothermal power plants .....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 23 |
| <b>4. Charakterystyka głównych struktur hydrogeotermalnych perspektywicznych dla technologii binarnych</b> ( <i>Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki, Marek Hajto, Bartosz Papiernik, Beata Kępińska, Wojciech Ciężkowski</i> ) .....                                                                                                           | 25 |
| 4.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 25 |
| 4.2. Niż Polski ( <i>Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki, Marek Hajto, Bartosz Papiernik</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                           | 25 |
| 4.2.1. Zbiornik dolnojurajski .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 26 |
| 4.2.2. Zbiornik dolnotriasowy .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 32 |
| 4.3. Niecka podhalańska ( <i>Beata Kępińska, Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 59 |
| 4.4. Sudety ( <i>Wojciech Ciężkowski, Anna Sowizdzał</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 66 |
| Summary – Characteristics of the main hydro-geothermal structures which are prospects for the use of binary technologies .....                                                                                                                                                                                                              | 74 |
| <b>5. Ocena uwarunkowań geologiczno-złożowych wytypowanych struktur hydrogeotermalnych</b> ( <i>Barbara Tomaszewska, Wiesław Bujakowski, Józef Chowaniec, Barbara Czerwińska, Bogusław Bielec, Aleksandra Kasztelewicz, Grażyna Hołojuch, Wojciech Franus, Tomasz Operacz, Piotr Freiwald, Grzegorz Leśniak, Anna Przelaskowska</i> ) ..... | 75 |
| 5.1. Wprowadzenie .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 75 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2. Rozpoznanie wiertnicze ( <i>Barbara Tomaszewska, Wiesław Bujakowski, Józef Chowaniec, Bogusław Bielec, Aleksandra Kasztelewicz, Grażyna Hołojuch, Tomasz Operacz, Piotr Freiwald</i> ) .....                                                                                                                                                                                       | 75  |
| 5.3. Charakterystyka mineralogiczno-petrograficzna skał zbiornikowych ( <i>Wojciech Franus, Barbara Tomaszewska</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                             | 82  |
| 5.3.1. Metodyka badań .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 82  |
| 5.3.2. Wyniki badań .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 82  |
| 5.4. Parametry petrofizyczne próbek rdzeni ( <i>Grzegorz Leśniak, Anna Przelaskowska</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 89  |
| 5.4.1. Podstawy teoretyczne badań petrofizycznych skał .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 89  |
| 5.4.2. Metodyka pomiarów .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 90  |
| 5.4.3. Wyniki badań .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 93  |
| 5.5. Reinterpretacja archiwalnych danych sejsmicznych dla wybranych rejonów ( <i>Barbara Czerwińska</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 96  |
| 5.5.1. Skierniewice – Łowicz, rejon: Kompina; rok 2006 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 97  |
| 5.5.2. Skierniewice – Łowicz, rejon: Kompina; rok 2007 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 98  |
| 5.5.3. Turek, Wartkowice-Poddębice i Koło-Ponętów; rok 2013 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 103 |
| Summary – Assessment of geological and deposit conditions of the selected hydrogeothermal structures .....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 114 |
| <b>6. Metodyka badań dla oceny stref perspektywicznych</b> ( <i>Wiesław Bujakowski, Leszek Pająk, Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Sławomir Wiśniewski, Władysław Nowak, Maciej Miecznik, Barbara Tomaszewska</i> ) .....                                                                                                                                                                | 115 |
| 6.1. Modelowanie numeryczne pracy złoża geotermalnego ( <i>Leszek Pająk, Maciej Miecznik, Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                           | 115 |
| 6.1.1. Parametryczny model 3D z użyciem kodu TOUGH2 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 115 |
| 6.1.2. Ogólne założenia dla przestrzennych modeli numerycznych .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 116 |
| 6.2. Metodyka oceny wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych i parametrów powierzchniowych na uzyskiwane efekty pracy instalacji binarnej ( <i>Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Sławomir Wiśniewski, Władysław Nowak</i> ) .....                                                                                                                                                         | 117 |
| 6.2.1. Parametry pracy elektrowni geotermalnej .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 117 |
| 6.2.2. Algorytm określania parametrów pracy siłowni z zastosowaniem czynnika suchego bez przegrzewania pary czynnika roboczego .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 119 |
| 6.2.3. Algorytm określania parametrów pracy siłowni z zastosowaniem czynnika suchego z przegrzewania pary czynnika roboczego .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 121 |
| 6.2.4. Algorytm określania parametrów pracy siłowni z zastosowaniem czynnika mokrego z przegrzewania pary czynnika roboczego .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 123 |
| 6.2.5. Założenia do oceny wpływu zmian parametrów wody termalnych i parametrów pracy instalacji na efektywność pracy systemu binarnego .....                                                                                                                                                                                                                                            | 125 |
| 6.2.6. Charakterystyka przyjętych układów technologicznych .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 126 |
| 6.2.7. Założenia dla oceny wskaźników energetycznych .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 129 |
| 6.3. Ocena wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych oraz efektów ekonomicznych ( <i>Leszek Pająk, Wiesław Bujakowski</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 132 |
| Summary – Research methodology for assessment of the prospect areas .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 136 |
| <b>7. Strefy perspektywiczne dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych w Polsce</b> ( <i>Wiesław Bujakowski, Leszek Pająk, Antoni Barbacki, Robert Szypczak, Maciej Miecznik, Barbara Tomaszewska, Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Władysław Nowak, Tomasz Operacz, Piotr Freiwald, Tomasz Kujawa, Aleksander A. Stachel</i> ) ..... | 139 |



|        |                                                                                 |     |                                                                                                                   |                                                                                                                |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1.   | Wprowadzenie .....                                                              | 139 | 7.7.4.                                                                                                            | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                                                    | 209 |
| 7.2.   | Koło .....                                                                      | 139 | 7.7.5.                                                                                                            | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                                                             | 213 |
| 7.2.1. | Ogólna charakterystyka strefy .....                                             | 139 | 7.7.6.                                                                                                            | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych .....                                | 215 |
| 7.2.2. | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                | 140 | 7.8.                                                                                                              | Stargard Szczeciński .....                                                                                     | 221 |
| 7.2.3. | Model numeryczny termiki górotworu .....                                        | 142 | 7.8.1.                                                                                                            | Ogólna charakterystyka strefy .....                                                                            | 221 |
| 7.2.4. | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                     | 143 | 7.8.2.                                                                                                            | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                                               | 221 |
| 7.2.5. | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                              | 150 | 7.8.3.                                                                                                            | Model numeryczny termiki górotworu .....                                                                       | 223 |
| 7.2.6. | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych ..... | 150 | 7.8.4.                                                                                                            | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                                                    | 224 |
| 7.3.   | Turek .....                                                                     | 156 | 7.8.5.                                                                                                            | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                                                             | 226 |
| 7.3.1. | Ogólna charakterystyka strefy .....                                             | 156 | 7.8.6.                                                                                                            | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych .....                                | 228 |
| 7.3.2. | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                | 156 | 7.9.                                                                                                              | Chociwel .....                                                                                                 | 234 |
| 7.3.3. | Model numeryczny termiki górotworu .....                                        | 158 | 7.9.1.                                                                                                            | Ogólna charakterystyka strefy .....                                                                            | 234 |
| 7.3.4. | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego.....                      | 159 | 7.9.2.                                                                                                            | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                                               | 234 |
| 7.3.5. | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                              | 161 | 7.9.3.                                                                                                            | Model numeryczny termiki górotworu .....                                                                       | 236 |
| 7.3.6. | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych ..... | 161 | 7.9.4.                                                                                                            | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                                                    | 237 |
| 7.4.   | Konin .....                                                                     | 167 | 7.9.5.                                                                                                            | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                                                             | 238 |
| 7.4.1. | Ogólna charakterystyka strefy .....                                             | 167 | 7.9.6.                                                                                                            | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych .....                                | 238 |
| 7.4.2. | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                | 168 | 7.10.                                                                                                             | Bańska Niżna .....                                                                                             | 246 |
| 7.4.3. | Model numeryczny termiki górotworu .....                                        | 169 | 7.10.1.                                                                                                           | Ogólna charakterystyka strefy .....                                                                            | 246 |
| 7.4.4. | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                     | 170 | 7.10.2.                                                                                                           | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                                               | 246 |
| 7.4.5. | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                              | 173 | 7.10.3.                                                                                                           | Model numeryczny termiki górotworu .....                                                                       | 249 |
| 7.4.6. | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych ..... | 173 | 7.10.4.                                                                                                           | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                                                    | 252 |
| 7.5.   | Ślesin .....                                                                    | 181 | 7.10.5.                                                                                                           | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                                                             | 252 |
| 7.5.1. | Ogólna charakterystyka strefy .....                                             | 181 | 7.10.6.                                                                                                           | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych .....                                | 254 |
| 7.5.2. | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                | 181 | 7.11.                                                                                                             | Cieplice Śląskie-Zdrój .....                                                                                   | 261 |
| 7.5.3. | Model numeryczny termiki górotworu .....                                        | 183 | 7.11.1.                                                                                                           | Ogólna charakterystyka strefy .....                                                                            | 261 |
| 7.5.4. | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                     | 183 | 7.11.2.                                                                                                           | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                                               | 261 |
| 7.5.5. | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                              | 186 | 7.11.3.                                                                                                           | Model numeryczny termiki górotworu .....                                                                       | 263 |
| 7.5.6. | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych ..... | 186 | 7.11.4.                                                                                                           | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                                                    | 267 |
| 7.6.   | Żnin .....                                                                      | 192 | 7.11.5.                                                                                                           | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                                                             | 271 |
| 7.6.1. | Ogólna charakterystyka strefy .....                                             | 192 | 7.11.6.                                                                                                           | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych .....                                | 271 |
| 7.6.2. | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                | 192 | Summary – Prospective areas for the combined production of electricity and heat in binary systems in Poland ..... | 279                                                                                                            |     |
| 7.6.3. | Model numeryczny termiki górotworu .....                                        | 194 | 8.                                                                                                                | <b>Klasyfikacja potencjalnych obszarów perspektywicznych</b> ( <i>Leszek Pająk, Wiesław Bujakowski</i> ) ..... | 285 |
| 7.6.4. | Program technologiczny zastosowania systemu binarnego .....                     | 195 | Summary – Classification of the prospect areas .....                                                              | 294                                                                                                            |     |
| 7.6.5. | Model numeryczny pracy dubletu geotermalnego .....                              | 199 | 9.                                                                                                                | <b>Podsumowanie</b> ( <i>Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska</i> ) .....                                   | 295 |
| 7.6.6. | Prognoza efektów finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych ..... | 199 | Summary .....                                                                                                     | 296                                                                                                            |     |
| 7.7.   | Łowicz .....                                                                    | 205 | <b>Spis literatury</b> .....                                                                                      | 299                                                                                                            |     |
| 7.7.1. | Ogólna charakterystyka strefy .....                                             | 205 | <b>Spis załączników</b> .....                                                                                     | 307                                                                                                            |     |
| 7.7.2. | Koncepcyjny model geologiczny i parametry hydrogeotermalne .....                | 206 |                                                                                                                   |                                                                                                                |     |
| 7.7.3. | Model numeryczny termiki górotworu .....                                        | 208 |                                                                                                                   |                                                                                                                |     |

## 1. WSTĘP (Wiesław Bujakowski, Barbara Tomaszewska)

Około dwie trzecie powierzchni Polski uznawane jest za perspektywiczne pod względem technologicznych możliwości zagospodarowania potencjału geotermalnego. Szczegółowe rozpoznanie struktur geologicznych, prezentowane w licznych dokumentacjach geologicznych, hydrogeologicznych, geofizycznych oraz pracach publikowanych – w szczególności w atlasach geotermalnych (Górecki (red.) 1990, 1995, 2006, 2011, 2012, 2013) wykazało istnienie potencjalnych, znaczących ilości energii geotermalnej w obrębie regionalnych jednostek geologicznych na głębokościach do 3000 metrów: Niżu Polskiego, Karpat Zachodnich i Wschodnich, zapadliska przedkarpackiego i Sudetów.

Podstawowe zasoby wód termalnych na Niżu Polskim związane są z warstwami wodonośnymi ery mezozoicznej. Wody termalne zakumulowane są przede wszystkim w formacjach piaszczystych dolnej kredy i dolnej jury. Znaczne zasoby energii geotermalnej występują również w zbiornikach: górnopodhalańskim, środkowopodhalańskim, górnopodhalańskim i dolnopodhalańskim (Górecki (red.) 2006). Korzystne warunki termiczne oraz specyfika wykształcenia litologicznego utworów skalnych oraz tektonika wskazują również na rejon Sudetów, jako obszar perspektywiczny w kontekście wykorzystania zasobów energii geotermalnej i/lub ciepła suchych skał (Wójcicki i in. (red.) 2013).

Wieloletnia eksploatacja zasobów wód termalnych na Podhalu, rozpoczęta w 1993 r. uruchomieniem przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie pierwszego w Polsce Doświadczalnego Zakładu Geotermalnego Bańska-Biały Dunajec, potwierdziła potencjał zbiornika niecki podhalańskiej jako ośrodka o najkorzystniejszych hydrogeologicznych warunkach występowania wód termalnych w Polsce. Zbiornik geotermalny buduje kilka poziomów wodonośnych występujących w wapieniach i dolomitach triasu, skałach węglanowych jury oraz utworach eocenu węglanowego (Kępińska 2006; Górecki (red.) 2006, 2011). Warstwy wodonośne występują bezpośrednio poniżej izolującej pokrywy fliszu podhalańskiego (eocen górny-oligocen). Miąższość skał zbiornikowych wynosi tutaj od 100 do 700 m. Natężenia samowypływu wód z odwiertów mieszczą się w przedziale 90–550 m<sup>3</sup>/h, a ich temperatura na wypływie ma od 20 do 86°C.

Zasoby energii geotermalnej i wód termalnych zagospodarowane zostały w naszym kraju do tychczas w sposób bezpośredni w ciepłownictwie, rekreacji, balneologii i lecznictwie (Bujakowski 2010; Kępińska 2013). Sukcesywny wzrost cen energii i wyczerpywanie zasobów konwencjonalnych nośników energii oraz pogłębiający się stan zanieczyszczenia atmosfery sprzyjają upowszechnieniu wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE). W ostatnich latach, na szczeblu krajów członkowskich Unii Europejskiej podejmowane są zarówno działania legislacyjne zmierzające do ograniczenia barier związanych z wykorzystaniem OZE, jak również stymulujące rozwój analizowanego sektora gospodarki (Bujakowski i in. 2010; Kępińska, Tomaszewska 2010; Pająk, Bujakowski 2013b). Czynniki te przyczyniają się do rozwoju nowych i udoskonalania istniejących technologii energetycznego wykorzystania OZE. W przypadku instalacji geotermalnych spowodowało to zdecydowane obniżenie bariery temperaturowej, technicznych możliwości produkcji energii elektrycznej z zasobów energii geotermalnej (Pająk, Bujakowski 2013b). Technologie, które w tym celu zostały zaadaptowane nazwano technologiami binarnymi, a siłownie pracujące przy ich wykorzystaniu – siłowniami binarnymi.

Siłownia binarna to system wytwarzający energię elektryczną, działający dzięki wykorzystaniu dwóch różnych płynów oddzielonych od siebie hydraulicznie (nie mieszających się). Płyn dostarczający energię (nośnik energii napędowej) cechuje się wyższą temperaturą parowania niż płyn roboczy napędzający turbinę (Pająk, Bujakowski 2013b). Turbina napędza wał generatora produkującego energię elektryczną. Podobnie definicję geotermalnej siłowni binarnej (ang. *binary cycle plant* lub *binary power plant*) ujęli Cleveland & Morris (2006) (Pająk, Bujakowski 2013b). Termin siłownia binarna wiązany jest z energią geotermalną; wynika to ze stosowania jako medium grzewczego płynu geotermalnego o temperaturze za niskiej by napędzać klasyczną turbinę parową (dla której czynnikiem napędzającym turbinę jest przegrzana para wodna).

Według stanu na koniec 2010 r., na całym świecie powstało 236 elektrowni geotermalnych, w tym kilkanaście na kontynencie europejskim, opartych na organicznym obiegu Rankine’a (ORC) lub według cyklu Kaliny (Bertani 2010). Intensywny rozwój wykorzystania technologii binarnych odnotowano ostatnio w Niemczech. Na koniec 2012 roku, całkowita moc zainstalowana w systemach ORC i Kaliny wyniosła tutaj ogółem 12,1 MW<sub>e</sub> (Ganz i in. 2013), a produkcja prądu osiągnęła w 2012 r. wielkość 25,4 GWh.

Podstawowym celem przedstawionej pracy była analiza polskich warunków hydrogeotermalnych w kontekście konwersji energii wód termalnych w energię elektryczną i ciepłą oraz wskazanie sposobu efektywnego wdrożenia technologii binarnych, uwzględniającego istniejący potencjał geotermalny i lokalne warunki infrastrukturalne.

Wstępne oceny warunków hydrogeotermalnych panujących w Polsce, zawarte w istniejącej literaturze, upoważniały do rozpoczęcia badań dla oceny potencjału i oceny możliwości realizacji tych inwestycji w naszym kraju. Warunkiem niezbędnym jest pozyskanie (na wypływie z odwiertu) wód termalnych o temperaturze i wydajności (parametry podstawowe) na poziomie odpowiednim dla analizowanych technologii. Na podstawie istniejących danych można spodziewać się spełnienia wymagań technologicznych i uzyskania odpowiednich parametrów ze zbiornika liasowego Niżu Polskiego i prawdopodobnie, lokalnie również pstręgo piaskowca oraz niecki podhalańskiej i Sudetów.

Dążąc do efektywności energetycznej oraz kompleksowego wykorzystania zasobów wód termalnych, technologie te powinny umożliwiać wykorzystanie zarówno energii elektrycznej jak i ciepłej. Za korzystne należy uznać również wykorzystanie schłodzonych wód w balneologii i rekreacji.

Przedstawione w niniejszym atlasie wyniki przeprowadzonych prac badawczych ukierunkowane były na: 1) wskazanie możliwości uzyskania w Polsce odpowiednich parametrów wód termalnych dla układów binarnych umożliwiających produkcję energii elektrycznej i ciepłej z tych wód; 2) wytypowanie stref perspektywicznych dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych; 3) wykonanie oceny produkcji energii i dostępnych mocy, przy wykorzystaniu modeli numerycznych pracy złoża; 4) rozpoznanie potencjalnych użytkowników/odbiorców energii, wraz z określeniem parametrów ciepłowniczych: istniejących źródeł ciepła, odbiorców ciepła oraz systemów dystrybucji energii; 5) dokonanie oceny przewidywanych efektów: finansowych, energetycznych, ekologicznych i społecznych realizacji wytypowanych przedsięwzięć. Należy zaznaczyć, że dane wejściowe do analiz, ocen i przeprowadzonych na ich podstawie symulacji prognostycznych cechowały się znacznym zróżnicowaniem ilościowym i jakościowym. Stąd, z uwagi na uwarunkowania naturalne i stan rozpoznania, przyjęte kryteria ocen i wyboru stref (obszarów)



perspektywicznych przedstawione w niniejszej pracy również cechują się zróżnicowaniem dla poszczególnych wskazań lokalizacyjnych.

Mamy nadzieję, że praca przyczyni się do zapoczątkowania działań ukierunkowanych na wykorzystanie w naszym kraju energii geotermalnej do produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu układów binarnych. Wierzimy również, że wyniki przedstawionych interdyscyplinarnych prac badawczych okażą się przydatne dla potencjalnych inwestorów i przedsiębiorców eksploatujących już zasoby wód termalnych w Polsce, instytucji projektujących nowe przedsięwzięcia geotermalne oraz jednostek naukowo-badawczych.

Praca zrealizowana została przez konsorcjum naukowe: Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz Oddziału Karpackiego Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego w Krakowie. Szeroki zakres tematyczny zadania wymagał zaangażowania wielu specjalistów, którym dziękujemy za ich wkład pracy.

## Introduction

*About two-thirds of Poland is considered to have promising geothermal potential for utilisation with up to date technology. A detailed evaluation of the geological structures was carried out and identified in numerous geological, hydrogeological, and geophysical reports and studies, in geothermal atlases (Górecki et al. 1990, 1995, 2006, 2011, 20012, 2013) and in other publications. This has proved the existence of potentially significant volumes of geothermal energy sources at depths of up to 3000 m in different areas of Poland including the Polish Lowland, Western and Eastern Carpathians, Carpathian Depression and Sudeten.*

*The major geothermal water resources in the Polish Lowland are associated with Mesozoic aquifers. Geothermal water has mostly accumulated in lower Cretaceous and upper Jurassic sandstone formations but significant geothermal energy resources also occur in cavities in the lower-, middle- and upper Jurassic (Górecki et al. 2006). Convenient thermal conditions, as well as the lithological profile of the rock formations and tectonics, also indicate the Sudeten area as a promising area in relation to the utilisation of geothermal energy and/or hot dry rocks (Wójcicki et al. 2013).*

*Utilisation of the geothermal waters in the Podhale region started in 1993 when the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences in Krakow set up the Bańska-Biały Dunajec Experimental Geothermal Institute, the first such centre in Poland. The research carried out there confirmed the potential of the reservoir in the Podhale Basin as the area with the hydrologically most suitable conditions for finding geothermal water resources in Poland. The geothermal reservoir consists of several aquifers located in Triassic limestone and dolomite, Jurassic carbonate rocks and Eocene carbonate structures (Kępińska 2006; Górecki et al. 2006, 2011). The thickness of the rocks which form the reservoir ranges from 100 to 700 m, with the aquifers lying*

*directly below an isolating cover of Podhale flysch (upper Eocene – Oligocene). The intensities of artesian flow from the wells lie within the range 90–550 m<sup>3</sup>/h, whereas their temperatures at the outlets range from 20 to 86°C.*

*Poland's geothermal energy resources and geothermal waters have so far been utilised directly for heating, recreation, balneology and therapy (Bujakowski 2010; Kępińska 2013). The sustained growth in energy prices, combined with the depletion of conventional energy media and increasing atmospheric pollution are reasons for promoting the use of renewable energy sources (RES). In recent years, the European Union Member States have initiated legislative programmes aimed at minimising the barriers to the use of RES as well as stimulating the growth of those sectors of the economy linked to it. (Bujakowski et al. 2010; Kępińska, Tomaszewska 2010; Pajqk, Bujakowski 2013b). These factors both influence the development of new RES technologies, and enable the perfecting of existing ones. In the case of geothermal installations, it has resulted in a significant relaxation of the conditions recognised as being technically viable for the generation of electricity from geothermal sources (Pajqk, Bujakowski 2013b). Technologies adapted to that purpose were called binary technologies, while generation sites using them are known as binary power plants.*

*A binary generator is a system producing electricity, which operates thanks to a combination of two different, hydraulically separated, liquids (not mixing). An energy-supply liquid (energy carrier) is characterised by a higher vaporisation temperature than the operating liquid powering the turbine (Pajqk, Bujakowski 2013b). The turbine drives the generator shaft producing the electricity. Similarly, the definition of the geothermal binary power plant was presented by Cleveland & Morris (2006) (Pajqk, Bujakowski 2013b). The term 'binary power plant' is related to the geothermal energy. Simply using the geothermal liquid as the geothermal medium would result in a temperature too low to power a classical steam turbine (for which the operating medium is super-heated steam).*

*As of the end of 2010 there were 236 geothermal power plants completed worldwide, including less than twenty on the continent of Europe operating according to the organic Rankine (ORC) or Kalina cycles (Bertani 2010). An intensive development in the use of binary technologies has recently been observed in Germany. By the end of 2012, the total power installed in ORC and Kalina systems had reached 12.1 MW<sub>e</sub> (Ganz et al. 2013), while electricity generation had totalled 25.4 GWh by the end of 2012.*

*The main goal of the study presented here is to analyse the suitability of the hydro-geothermal conditions existing in Poland for generating electricity from geothermal waters, as well as to select the most effective method for implementing binary technologies taking account of the existing geothermal potential and local infrastructural conditions.*

*Initial assessments of the hydro-geothermal conditions in Poland found in the existing literature were used to initiate a study designed to evaluate the potential for and feasibility of carrying out such investments in our country. An essential precondition is to obtain data on the temperature of geothermal water (at the well outlet) and the efficiency (basic parameters) of its production which are criteria relevant to the technologies being considered. Based on existing data, it can be expected that the technological requirements within satisfactory production parameters could be met in the Lias reservoir of the Polish Lowland, and probably also locally in the mottled sandstone of the Podhale Basin and in the Sudeten.*

*These technologies are designed for high energy performance and comprehensive utilisation of geothermal water resources and should allow for the production of both electricity and heat. It may also be convenient to use the cooled waters for balneology and recreation.*

*The results of the study presented in the current atlas were directed at: 1) indicating the opportunities existing in Poland for obtaining suitable geothermal water parameters for binary systems producing both heat and electricity; 2) suggesting prospective areas for joint production of heat and electricity through binary systems; 3) assessing the energy generation potential and the power available using numerical models for the exploitation of deposits; 4) identifying the potential energy end-users, taking account of data on existing sources of heating and heat consumers as well as the energy distribution systems; 5) evaluating forecasts of the financial, energy, ecological and social effects of proposed projects.*

*We do hope the current study contribute to the initiation of projects designed to use geothermal energy for electricity generation using binary systems. We also believe the results of the interdisciplinary studies presented here will prove useful to potential investors and entrepreneurs already*

*using geothermal water resources in Poland, as well as to institutions designing new geothermal enterprises and scientific & research organisations.*

*The work has been carried out by a scientific consortium of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences in Krakow, AGH University of Science and Technology in Krakow and the Carpathian Division of the Polish Geological Institute – National Research Institute in Krakow. The broad scope of the research called for the involvement of many specialists whom we would hereby like to thank for their contribution to the study.*





## 2. PRZEGLĄD WARUNKÓW GEOLOGICZNO-ZŁOŻOWYCH ODPOWIEDNICH DLA WYKORZYSTYWANIA WODY TERMALNEJ W SKOJARZONEJ PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPŁA (Beata Kępińska)

### 2.1. Wprowadzenie

Złoża wód i par geotermalnych są nagromadzeniami ciepła Ziemi w zbiornikach skalnych, które występują na głębokościach pozwalających na ich opłacalną ekonomicznie i możliwą pod względem technicznym eksploatację. Z uwagi na cechujące je temperatury klasyfikowane są ogólnie na wysokotemperaturowe (temperatury na głębokości 1 km przekraczają 150–200°C) i złoża niskotemperaturowe (temperatury na głębokości 1 km są niższe od 150°C).

Złoża wysokotemperaturowe (złoża par) występują w obszarach współczesnej lub niedawnej działalności wulkanicznej lub tektonicznej; związane są głównie z aktywnymi brzegami płyt litosferycznych. Bezpośrednim źródłem ciepła jest magma umiejscowiona płytko w skorupie ziemskiej (wydobywająca się jako lawa podczas erupcji wulkanicznych).

Złoża niskotemperaturowe (złoża wód) cechują się znacznie większym rozprzestrzenieniem niż złoża par, a ich obecność nie ogranicza się do aktywnych brzegów płyt litosferycznych, gdyż źródłem ciepła jest naturalny strumień ciepły Ziemi. Złoża takie znane są z wielu struktur geologicznych, m.in. w Europie, stanowiąc podstawę dla bezpośredniego stosowania energii geotermalnej w wielu krajach. Coraz częściej są one eksploatowane i brane pod uwagę jako perspektywiczne dla generacji energii elektrycznej w systemach binarnych (często w skojarzeniu z produkcją ciepła), zwłaszcza jeśli temperatury wydobywanych z nich wód osiągają przynajmniej 80–90°C.

W uzupełnieniu należy podać, że znaczne ilości ciepła są również zawarte w tzw. gorących suchych skałach (ang. *Hot Dry Rocks*, HDR), które nie zawierają wód ani par, posiadają natomiast stosunkowo wysokie temperatury (powyżej 150–200°C już na głębokościach rzędu 3000–4000 m p.p.t.). W wielu krajach są one przedmiotem prac ukierunkowanych na technologię odzyskiwania z nich ciepła dla potrzeb generacji energii elektrycznej w systemach binarnych, często w skojarzeniu z produkcją ciepła. W Europie pierwsze instalacje tego typu pracują we Francji i w Niemczech. Kilka następnych jest w różnych stadiach realizacji, a przynajmniej kilkanaście w trakcie prac projektowych, ocen możliwości technicznych i opłacalności ekonomicznej (*EGEC Geothermal Market Report 2012*).

### 2.2. Europa – zarys warunków geotermalnych

Kontynent europejski budują trzy główne jednostki geostrukturalne:

- ♦ platforma prekambryjska Europy północnej i wschodniej,
- ♦ platforma paleozoiczna Europy środkowej i zachodniej (pokryta seriami permu i mezozoiku, a także młodszymi osadami),
- ♦ system alpejski.

W efekcie zróżnicowanej ewolucji geologicznej, tektonicznej, wieku poszczególnych jednostek, różnią się one m.in. także wartościami parametrów termicznych. Gęstość naturalnego strumienia ciepłego waha się generalnie w zakresie 30–80 mW/m<sup>2</sup>, przy czym najniższe wartości charakteryzują platformę prekambryjską. Najwyższe wartości 80–150 mW/m<sup>2</sup> cechują natomiast niektóre obszary Europy południowej (aktywne tektonicznie i wulkanicznie), region Larderello (Włochy), basen panoński, rów górnego Renu.

Warunki termiczne oraz geologiczne powodują, że w Europie dominują złoża wód termalnych o temperaturach, które nie przekraczają 150°C. Złoża wysokotemperaturowe są natomiast znane tylko z kilku obszarów o współczesnej lub niedawnej aktywności wulkanicznej lub tektonicznej (Włochy, Turcja, Grecja, Portugalia – Azory, a także Islandia – poza kontynentalną częścią Europy).

Do głównych obszarów w Europie (poza Islandią), w których eksploatowane są zasoby wód termalnych, należą:

- ♦ basen paryski (Francja),
- ♦ basen akwitański (Francja),
- ♦ region Larderello (Włochy) – eksploatowane są przede wszystkim zasoby par,
- ♦ basen środkowoeuropejski (Dania, Niemcy – basen północnoniemiecki, Polska – basen polski, określany też jako Niż Polski),
- ♦ basen panoński (Węgry, Słowacja, Serbia, Słowenia, Rumunia, Austria),
- ♦ Karpaty wewnętrzne – mezozoiczne serie podłoża trzeciorzędowych basenów otaczających Tatry (Polska, Słowacja) i kilku innych (Słowacja),
- ♦ basen molasowy przedgórza Alp (Niemcy),
- ♦ rów górnego Renu (Francja, Niemcy, Szwajcaria),
- ♦ inne obszary alpejskie i starsze S-Europy (Włochy, Bułgaria, Macedonia, Grecja, Turcja).

Głównymi typami litologicznymi skał zbiornikowych wód termalnych są utwory osadowe (wapień i dolomity, piaskowce), ponadto skały wulkaniczne oraz spękane i zeszcelinowane partie skał krystalicznych i metamorficznych.

### 2.3. Warunki geologiczno-złożowe perspektywiczne dla skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła – przykłady

Podobnie jak w innych krajach, także w Polsce wzrasta zainteresowanie perspektywami generacji energii elektrycznej w systemach binarnych przy zastosowaniu wód termalnych, stąd też w rozdziale podano kilka przykładów z państw europejskich, które ilustrują warunki geologiczno-złożowe sprzyjające takiemu sposobowi jej wytwarzania. Niektóre z przykładów dotyczą warunków zbliżonych do stwierdzonych w naszym kraju, a nawet opisują jednostki geologiczne, które występują również w Polsce (basen polski, Karpaty Wewnętrzne).

#### 2.3.1. Niemcy

Zasoby wód termalnych w Niemczech związane są głównie z trzema jednostkami strukturalnymi: basenem północnoniemieckim, basenem molasowym przedgórza Alp (południowoniemieckim) oraz rowem górnego Renu (Schellschmidt i in. 2010). Są one perspektywiczne dla bezpośredniego wy-



korzystania, a w niektórych partiach także do generacji energii elektrycznej w systemach binarnych (zwłaszcza basen molasowy i rów górnego Renu zawierający zarówno zbiorniki wód termalnych jak i systemy gorących suchych skał). W pięciu przypadkach skojarzona produkcja energii elektrycznej i ciepła przy zastosowaniu wód termalnych ma już miejsce od kilku lat, a wiele następnych projektów w tym zakresie jest w różnych fazach realizacji (*EGEC Geothermal Market Report 2012*).

*Basen północnoniemiecki* jest centralną częścią rozległego basenu środkowoeuropejskiego, który kontynuuje się na północny zachód do Danii, a w kierunku wschodnim jego kontynuacją jest basen polski (zajmujący ok. 80% powierzchni naszego kraju). Miąższość wypełniających go serii waha się w zakresie 2–10 km. Jego mezozoiczna część – perspektywiczna dla występowania zasobów wód termalnych odpowiednich do wykorzystania bezpośredniego, a także do generacji energii elektrycznej w systemach binarnych – zbudowana jest z utworów piaskowcowych, węglanowych i ilastych, z licznymi strukturami halokinetycznymi. Obejmuje sześć serii skał zbiornikowych (wieku triasowego, jurajskiego oraz kredowego) wód termalnych, nadających się do bezpośredniego wykorzystania. W niektórych fragmentach basenu temperatury wgłębne osiągają powyżej 80–100°C, co sprzyja ich wykorzystywaniu do ewentualnej generacji energii elektrycznej (Schellschmidt i in. 2010; Ganz i in. 2013). W północno-wschodniej części tego basenu (graniczącej od wschodu z położoną na terenie Polski niecką szczecińską) wody termalne stosowane są od wielu lat do celów grzewczych, a w przypadku Neustadt-Glewe – także w kogeneracji z produkcją energii elektrycznej (do 2013 r.). W tej miejscowości woda o temperaturze na wypływie 97°C i wysokiej mineralizacji (220 g/dm<sup>3</sup>) eksploatowana jest z piaskowców górnotriasowych z głębokości 2,2–2,3 km dla celów ciepłowniczych, a w 2003–2012 r. produkowana była energia elektryczna za pomocą turbiny o mocy 210 kW<sub>e</sub> (Seibt i in. 2005; [www.gtn-online.de](http://www.gtn-online.de)). Wysoka mineralizacja wody termalnej spowodowała, że instalacje wgłębne i napowierzchniowe są wykonane z materiałów odpornych na jej agresywne oddziaływanie – zastosowano m.in. tytanowe wymienniki ciepła, włókno szklane w innych elementach instalacji (rurociągi przesyłowe i kolumny eksploatacyjne rur w otworach) (Machoń 2012).

Kolejnym obszarem perspektywnym – zarówno dla bezpośrednich zastosowań geotermalnych jak i generacji energii elektrycznej – jest *basen molasowy przedgórza Alp* na południu Niemiec (jego całkowita długość wynosi ponad 300 km – od Szwajcarii poprzez Niemcy do Austrii). Wypełniają go węglanowe i piaskowcowe serie kenozoiku, a ich podłoże budują formacje mezozoiczne, które zawierają osiem zbiorników wód termalnych, przy czym najlepsze parametry złożowe posiadają skrasowiaste wapienie górnourajskie o całkowitej miąższości dochodzącej do kilkuset metrów (Ganz i in. 2013). Należą one do jednego z najważniejszych zbiorników hydrogeotermalnych w Europie. Utwory basenu i jego podłoże zapadają ku południowi (w kierunku Alp), z czym związany jest m.in. wzrost temperatur wgłębnych w poszczególnych zbiornikach w tym kierunku. W przypadku zbiornika w wapieniach górnourajskich osiągają one w rejonie Monachium wartości powyżej 90–100°C, co umożliwia ich wykorzystywanie do produkcji energii elektrycznej (zwykle w kogeneracji z produkcją ciepła). Działalność w tym zakresie rozwija się intensywnie od kilkunastu lat, pracuje już instalacja kogeneracyjna w Unterhaching, w trakcie realizacji jest kilka następnych (*EGEC Geothermal Market Report 2012*).

*Rów górnego Renu* przebiega od okolic Frankfurtu w kierunku południowo-zachodnim do okolic Bazylei w Szwajcarii. Jest częścią systemu ryftowego, przecinającego europejską platformę paleozoiczną. Rów powstał w kenozoiku (45–60 mln lat temu) jako efekt podniesienia granicy skorupy

i płaszczu Ziemi przez głębokie (80–100 km) intruzje magmowe (Ganz i in. 2013). Gradient geotermiczny jest wysoki: do 5°C/100 m i nieco powyżej, przy średniej dla Niemiec wynoszącej 3°C/100 m. W obrębie omawianej struktury znajduje się sześć zbiorników wód termalnych odpowiednich dla zastosowań bezpośrednich, niekiedy także do generacji energii elektrycznej. Związane są one ze skałami osadowymi (piaskowcami, seriami węglanowymi) wieku permskiego (czerwonego spągowca), triasowego (pstręgo piaskowca, wapienia muszlowego) – w obrębie tych zbiorników temperatury osiągają do 110–140°C, a także jurajskiego i kenozoicznego (Schellschmidt i in. 2010). Podłoże serii osadowych rowu górnego Renu budują serie krystaliczne – waryscyjskie granitoidy i gnejsy, perspektywiczne jako gorące suche skały (temperatury powyżej 130°C). W ostatnich kilku latach uruchomiono trzy instalacje binarne do produkcji energii elektrycznej, następne są w różnych stadiach projektów i opracowań studyjnych (Ganz i in. 2013).

Oprócz podłoża wymienionego rowu serie krystaliczne (w obrębie których temperatury na głębokości 3 km wynoszą przynajmniej 130°C) perspektywiczne jako gorące suche skały zajmują w Niemczech rozległe obszary w podłożu młodszych serii permsko-mezozoicznych (Schellschmidt i in. 2010).

### 2.3.2. Węgry

Węgry są krajem, który posiada jedno z najlepszych w Europie warunków geologicznych i termicznych dla wszechstronnego wykorzystywania wód i energii geotermalnej. Kraj ma w tym zakresie bardzo długie tradycje, należy do wiodących w Europie i na świecie pod względem zastosowań bezpośrednich (Lund i in. 2010). Posiada także odpowiednie warunki hydrogeotermalne (również struktury HDR) do generacji energii elektrycznej w systemach binarnych (pierwszy projekt w tym zakresie został już zainicjowany: *EGEC Geothermal Market Report 2012*). Niemal cały obszar kraju zajmuje basen panoński, zawierający wiele zbiorników wód termalnych. Na Węgrzech pracuje ponad 900 otworów, z których wody te są wydobywane z głębokości 1–2,1 km i wykorzystywane w ciepłownictwie, rolnictwie, hodowli zwierząt, a także na bardzo dużą skalę w rekreacji i balneoterapii (Toth 2010).

Obszar Węgier posiada bardzo wysoki gradient geotermiczny, który wynosi średnio 4–5°C/100 m, charakteryzuje go również anomalnie wysoki strumień cieplny – średnio około 90 mW/m<sup>2</sup> (Toth 2010). Szczególną pozycję zajmuje przy tym basen panoński: strumień cieplny wynosi średnio 90–100 mW/m<sup>2</sup> (przy wahaniami w zakresie 50–130 mW/m<sup>2</sup>), a miejscami nawet więcej, podczas gdy gradient geotermiczny wynosi średnio 4,5°C/100 m. Te wyjątkowe warunki cieplne związane z płytkim położeniem astenosfery poniżej stosunkowo cienkiej litosfery (do 22–26 km p.p.t.), co jest efektem procesów formujących basen panoński w środkowym i górnym miocenie (Nador i in. 2013).

*Basen panoński* położony jest na terenie kilku państw – Węgier, Serbii, Słowacji, Słowenii oraz Rumunii (przy czym największy obszar, o najlepszych parametrach złożowych, znajduje się na obszarze Węgier). Basen ograniczony jest od zachodu przez Alpy, od północy i wschodu przez Karpaty, a od południa przez Góry Dynarskie. Jest to ogromne tektoniczne zapadlisko między Alpami i Karpatami, w którym w kenozoiku istniało śródlądowe morze panońskie (połączone z ówczesnym Morzem Śródziemnym). Pod koniec tej epoki uległo ono spłyceniu i przekształciło się w tzw. jezioro panońskie, które w czwartorzędzie zostało w całości zasypane przez osady rzeczne. Miąższość osadów wypełniających współcześnie basen panoński osiąga kilka kilometrów (maksymalnie do 10 km). W ich obrębie

wyróżniono cztery poziomy wód termalnych (górny miocen–pliocen; tzw. sekwencja panońska), których skałami zbiornikowymi są serie piaskowcowe, turbidyty z piaskowcami laminowanymi, a także biogeniczne wapienie (środkowy miocen). Osiągają one miąższości 100–300 m, zalegają w przedziale głębokości 700–1800 m p.p.t., cechują je temperatury w zakresie 60–90°C. Porowatość całkowita podanych skał zbiornikowych osiąga 20–30%, przepuszczalność wynosi 500–1500 mD. Pod względem hydrogeologicznym są to zbiorniki zamknięte (Nador i in. 2013).

Podłoże basenu panońskiego stanowią mezozoiczne skały węglanowe (często intensywnie skrasowiałe), a także paleozoiczne serie krystaliczne (miejscami zeszcelinowane). Zawierają one również zbiorniki wód termalnych, które cechuje wysoka szczelinowatość wtórna. Temperatury na głębokościach 2 km p.p.t. osiągają 100–140°C. Są to zatem perspektywiczne warunki dla zastosowania wód nie tylko do celów ciepłowniczych, ale także do generacji (kogeneracji) energii elektrycznej w systemach binarnych. W podłożu basenu panońskiego znajdują się także zbiorniki zawierające pary: z głębokości 3,8 km, z zeszcelinowanych dolomitów, uzyskano dopływ pary o temperaturze na powierzchni około 190°C i ciśnieniu 360 bar (Nador i in. 2013).

Poza systemami hydrogeotermalnymi, basen panoński jest perspektywiczny także w odniesieniu do systemów gorących suchych skał, a południowo-wschodni segment podłoża tej struktury należy do jednego z najbardziej obiecujących w Europie (duże kompleksy granitoidowe, temperatury powyżej 200°C, ekstensyjny układ naprężeń itd.; Nador i in. 2013).

### 2.3.3. Słowacja

Pod względem geologicznym obszar Słowacji budują Karpaty zachodnie (2/3 powierzchni kraju) oraz basen panoński. Strumień cieplny osiąga wysokie wartości, które we wschodniej części tego basenu dochodzą do około 115 mW/m<sup>2</sup>. W przypadku Karpat zachodnich najwyższe wartości cechują ich wewnętrzną część, podczas gdy w kierunku partii zewnętrznych obserwuje się spadek wartości strumienia cieplnego. Maksymalne różnice średniej gęstości strumienia cieplnego na Słowacji wynoszą natomiast około 55 mW/m<sup>2</sup> i spowodowane są zróżnicowaniem tektonicznym i strukturalnym w budowie tego kraju (Kamenska 2009).

Budowa geologiczna i parametry geotermiczne powodują, że Słowacja posiada bardzo dobre warunki dla występowania wód termalnych. Stwierdzono je w basenie panońskim i w wewnętrznej części Karpat zachodnich. W przypadku Karpat zbiorniki tych wód związane są przede wszystkim z triasowymi dolomitami i wapieniami serii kriżniańskiej, a także choczańskiej. Ich utwory budują podłoża kenozoicznych zapadlisk (niecek), w tym także otaczających Tatry (położona po północnej stronie tego masywu i należąca do Polski niecka podhalańska posiada analogiczną budowę, również zawiera zbiorniki wód termalnych o korzystnych parametrach złożowych i eksploatacyjnych, perspektywicznych w niektórych miejscach także do generacji energii elektrycznej w systemach binarnych). W obrębie basenu panońskiego zbiorniki geotermalne występują natomiast w trzeciorzędowych piaskach, piaskowcach, zlepieńcach, a ponadto w andezytach i pokrewnych skałach piroklastycznych. Zbiornikami wód termalnych są także skały mezozoiczne, budujące płaszczowinowe struktury jednostki Silicum w południowej części kraju. Na Słowacji wyróżniono dotychczas 27 obszarów hydrogeotermalnych (Fendek, Fendekova 2010). Wykorzystanie wód termalnych obejmuje sektor ciepłowniczy, a także lecznictwo i rekreację – w tym względzie kraj należy do wiodących w Europie, o wysokiej dynamice rozwoju.

Niektóre obszary Słowacji są perspektywiczne pod względem możliwości generacji energii elektrycznej w systemach binarnych. Należy do nich zwłaszcza rejon Koszyc, położony w północno-wschodniej części basenu panońskiego, gdzie stwierdzono wody o temperaturach rzędu 130–180°C (kenozoiczne serie osadowe i wulkaniczne). Mineralizacja wód zależy od głębokości ich występowania. Na głębokości około 1500 m wynosi ona 10 g/dm<sup>3</sup>, a w głębszych partiach dochodzi do 100 g/dm<sup>3</sup>. Szczególnie perspektywiczna jest struktura Svinica-Durkov, w której na głębokościach 2200–3200 m p.p.t. stwierdzono wody o temperaturze około 130°C, mineralizacji 30 g/dm<sup>3</sup> i spodziewanej wydajności w zakresie 200–600 m<sup>3</sup>/h (Fendek, Fendekova 2010). Parametry te sprzyjają wykorzystywaniu wód także do produkcji energii elektrycznej; realizowany jest projekt ukierunkowany na uruchomienie instalacji binarnej o mocy około 3,5 MW<sub>e</sub> (EGEC *Geothermal Market Report 2012*).

Inną strukturą o bardzo dobrych warunkach geotermalnych w pobliżu Koszyc jest struktura Besa-Cicarovce, w której wartość gęstości strumienia cieplnego wynosi 120 mW/m<sup>2</sup>, a temperatury skał na głębokości 2500 m osiągają około 135°C (możliwe jest też występowanie wód termalnych i uzyskanie ich znaczącego dopływu) (Janku, Magyar 2001).

W podłożu basenu Koszyc możliwe jest także występowanie gorących suchych skał – wczesno-paleozoicznych formacji metamorficznych i późnopaleozoicznych serii krystalicznych (Janku, Magyar 2001). Jest to zatem sytuacja analogiczna jak w przypadku węgierskiej części basenu panońskiego.

### 2.3.4. Rumunia

W obszarze Rumunii znajdują się liczne zbiorniki wód termalnych związane z piaskowcami basenu panońskiego, mezozoicznymi seriami węglanowymi jego podłoża, utworami Karpat i płyty mezyjskiej. Do głównych rejonów, gdzie wody te są eksploatowane dla potrzeb bezpośredniego wykorzystania, należą miasto Oradea i pobliski kurort Baile Felix na zachodzie kraju. W 2012 r. rozpoczęto ponadto generację energii elektrycznej w systemie binarnym (w skali doświadczalnej) (Bendea i in. 2013).

Skałami zbiornikowymi wód termalnych są wapienie i dolomity triasu należące do podłoża wschodniego krańca basenu panońskiego. W rejonie Oradei zalegają na głębokości 2,2–3,2 km p.p.t. Złoże typu szczelinowego jest eksploatowane przez dwanaście otworów, wypływy wód mają charakter artezyjski, a ich łączna wydajność osiąga około 500 m<sup>3</sup>/h. Gradient geotermiczny określono na 3,5–4,3°C/100 m (Antal, Rosca 2008). Temperatury wód na wypływach dochodzą do 70–105°C. Mineralizacja wody nie przekracza 1,2 g/dm<sup>3</sup>. Zbiornik w utworach triasowych jest hydraulicznie połączony z płytszym (50–450 m p.p.t.) zbiornikiem w seriach kredowych eksploatowanym w kurorcie Baile Felix. Wydajność z sześciu otworów wynosi łącznie około 750 m<sup>3</sup>/h, temperatura głowicowa wydobywanej wody (do celów leczniczych) 36–48°C i posiada jakość wody pitnej. Obszar zasilania zbiorników geotermalnych znajduje się na północnych stokach jednego z łańcuchów Karpat. Wiek wody określono na około 20 000 lat. Pomimo wysokiego naturalnego zasilania, wydobywanie wody ze znaczną łączną wydajnością powyżej 1000 m<sup>3</sup>/h prowadziło do spadku ciśnienia złożowego (czemu zapobiega się od 1992 r. poprzez zatłaczanie wykorzystanej wody). Woda termalna ze złoża w Oradei jest zagospodarowana dla potrzeb miejskiej sieci ciepłowniczej (c.o.) i ciepłej wody użytkowej (c.w.u), budynków kampusu uniwersyteckiego, szklarni, w basenach rekreacyjnych. W 2013 r. na Uniwersytecie w Oradei uruchomiono pierwszą w Rumunii pilotową instalację



binarną do generacji energii elektrycznej o mocy 50 kW<sub>e</sub>. Stosowana woda termalna posiada temperaturę poniżej 100°C (Bendea i in. 2013).

Z utworami triasowymi związany jest także zbiornik wód termalnych eksploatowany w miejscowości Bors w pobliżu Oradei. Pomimo położenia na podobnej głębokości, cechują go nieco inne parametry: wyższy gradient geotermiczny (4,5–5,0°C/100 m), wyższa temperatura złożowa (ok. 130°C na głębokości 2,5 km) i temperatura głowicowa – 115°C przy wydajności wody 180 m<sup>3</sup>/h, wyższa mineralizacja (13 g/dm<sup>3</sup>), zawartość rozpuszczonych gazów (dwutlenku węgla i metanu), wysoka tendencja do wytrącania wtórnych minerałów („skalingu”). Cechy te wiążą się z faktem, że jest to zamknięty zbiornik z uwagi na uwarunkowania tektoniczne. Zrównoważona eksploatacja wody i utrzymywanie stabilnego ciśnienia artezyjskiego są możliwe dzięki zatłaczaniu zużytej wody do złoża. Woda termalna jest zagospodarowana do ogrzewania kompleksu szklarni (Antal, Rosca 2008).

## **Summary – Review of the geological and reservoir conditions required for the use of geothermal water in the combined production of heat and electricity**

*The European continent consists of three main geo-structural units: the Precambrian platform of Northern and Eastern Europe, the Palaeozoic platform of Central and Western Europe (covered by Permian and Mesozoic series as well as younger sediments), and the Alpine system.*

*The thermal and geological conditions in Europe have resulted in a predominance of thermal waters whose temperatures do not exceed 150°C. High-temperature aquifers are located in just*

*a few regions exhibiting contemporary or recent volcanic or tectonic activity (Italy, Turkey, Greece, Portugal – Azores, as well as Iceland outside of the continental part of Europe).*

*The main European regions (excluding Iceland), where geothermal water resources are used include the Paris and Aquitaine Basins (France), the Larderello region (Italy) where it is mainly steam resources that are used the Central European Basin (Denmark, the North German Basin in Germany, the Polish Basin (also called the Polish Lowland), the Pannonian Basin (Hungary, Slovakia, Serbia, Slovenia, Romania, Austria), the Inner Carpathians using the Mesozoic floor series of the Tertiary basins surrounding the Tatra mountains (Poland, Slovakia) and several other areas (Slovakia), the Subalpine Molasse Basin (Germany), the Upper Rhine Graben (France, Germany, Switzerland), and other Alpine and older Southern European regions (Italy, Bulgaria, Macedonia, Greece, Turkey etc.).*

*The main lithological types forming geothermal water reservoirs are sedimentary rocks (limestones and dolomites, sandstones) as well as volcanic rocks and fractured sections of crystalline and metamorphic rocks.*

*Germany, Hungary, Slovakia and Romania can provide suitable examples of geothermal conditions similar to those found in Poland (Polish Basin, Inner Carpathians).*

*The geothermal water resources in Germany are mainly related to three structural units: the North German Basin, the Subalpine Molasse Basin (South Germany), as well as the Upper Rhine Graben (Schellschmidt et al. 2010). Hungary can be mentioned here as the country featuring some of the best thermal and geological conditions for the multi-purposed of geothermal water and energy uses. Almost the whole area of the country is covered by the Pannonian Basin containing many geothermal water reservoirs. There are more than 900 operational wells in Hungary extracting water from depths of 1–2.1 km to be used in heating, agriculture, livestock breeding and, on a large scale, in recreation and balneotherapy (Toth 2010). Slovakia, as far as the geological aspects are concerned, consists of the Western Carpathians (2/3 of the area of the country) and the Pannonian Basin. In Romania, many geothermal water reservoirs are located in the Pannonian Basin sandstones, the Mesozoic carbonate series of its floor, Carpathian structures and the Moesian platform. The main regions, where the water is used directly include Oradea city and the nearby resort of Baile Felix in the western part of the country. In 2012 electricity generation using a binary system commenced on an experimental scale (Bendea et al. 2013).*



### 3. PRZEGLĄD TECHNOLOGII I ELEKTROWNI GEOTERMALNYCH

(Aleksander A. Stachel, Wiesław Bujakowski, Leszek Pająk, Barbara Tomaszewska, Aleksandra Kasztelewicz, Radomir Kaczmarek, Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur, Roksana Mazurek)

#### 3.1. Wprowadzenie

Pierwsza instalacja wytwarzająca energię elektryczną z energii geotermalnej powstała w miejscowości Larderello we Włoszech (Toskania), gdzie w 1911 roku uruchomiono elektrownię komercyjną o mocy 250 kW<sub>e</sub>, wykorzystującą bogate w tym regionie zasoby geotermalnej pary suchej. Do 1958 roku, kiedy to w Nowej Zelandii została oddana do eksploatacji siłownia o mocy 50 MW<sub>e</sub>, był to jedyny na świecie zakład produkujący energię elektryczną na bazie energii pozyskanej z wnętrza Ziemi (DiPippo 2005).

Obecnie elektrownie geotermalne eksploatowane są w 25 krajach świata. W 2010 roku ich łączna moc była szacowana na około 10 715 MW<sub>e</sub> (Bertani 2010) przy rocznej produkcji energii elektrycznej 67 246 GWh (Bertani 2010). W czołówce państw intensywnie rozwijających ten rodzaj energetyki i dysponujących największą mocą zainstalowaną są: Stany Zjednoczone, Filipiny, Indonezja, Meksyk, Włochy, Islandia i Japonia (tab. 3.1.1). W grudniu 2012 roku moc elektryczna wszystkich elektrowni geotermalnych wynosiła już 11 130,6 MW<sub>e</sub>, wykazując 3,9% przyrost w stosunku do roku 2010 (IGA News 2012).

Tabela 3.1.1. Kraje o największej mocy zainstalowanej i produkcji energii elektrycznej (dane wg stanu na rok 2010) (Bertani 2010)

Table 3.1.1. Countries with the greatest installed capacity and electricity production (data as at 2010) (Bertani 2010)

| Kraj              | Moc zainstalowana [MW <sub>e</sub> ] | Produkcja energii elektrycznej [GWh/rok] |
|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| Stany Zjednoczone | 3 093                                | 16 603                                   |
| Filipiny          | 1 904                                | 10 311                                   |
| Indonezja         | 1 197                                | 9 600                                    |
| Meksyk            | 958                                  | 7 047                                    |
| Włochy            | 843                                  | 5 520                                    |
| Islandia          | 575                                  | 4 597                                    |
| Japonia           | 536                                  | 3 064                                    |
| Salwador          | 204                                  | 1 422                                    |
| Kenia             | 167                                  | 1 430                                    |
| Kostaryka         | 166                                  | 1131                                     |

W Europie i azjatyckiej części Turcji, w 2010 roku, całkowita moc wszystkich elektrowni geotermalnych wyniosła 1 553 MW<sub>e</sub>, przy produkcji energii elektrycznej 12 372 GWh/rok. Stanowiło to odpowiednio 14,5% udziału w mocy zainstalowanej i 18,4% w generacji energii elektrycznej z geotermii (Bertani 2010). Według stanu na koniec 2012 roku, energia elektryczna produkowana była we Włoszech (moc zainstalowana 880 MW<sub>e</sub>), na Islandii (664 MW<sub>e</sub>), w Turcji (81,6 MW<sub>e</sub>), Portugalii (23 MW<sub>e</sub>), Francji (16,2 MW<sub>e</sub>), Niemczech (6,6 MW<sub>e</sub>) i Austrii (1,4 MW<sub>e</sub>) (IGA News 2012).

W przypadku eksploatacji wód termalnych, których temperatura na wypływie z ujęcia jest niższa od około 150°C, prąd elektryczny generowany jest w instalacjach binarnych. Dąży się, by systemy te pracowały w skojarzeniu, dostarczając także energię ciepłą na potrzeby ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej.

#### 3.2. Stosowane rozwiązania techniczne

Elektrownia geotermalna składa się z dwóch sprzężonych ze sobą systemów: *systemu pozyskiwania* oraz *systemu wykorzystania* energii geotermalnej (Nowak i in. 2008).

Zadaniem systemu pozyskiwania energii jest wyprowadzenie z wnętrza Ziemi medium (wody lub pary wodnej), które jest nośnikiem energii niezbędnej do zasilenia systemu powierzchniowego.

W skład systemu wykorzystania i transformacji energii geotermalnej wchodzi urządzenia techniczne i czynniki robocze, umożliwiające konwersję energii zawartej w wodzie lub parze wodnej w pracę i następnie w energię elektryczną. Rodzaj zastosowanego systemu wytwarzania energii elektrycznej zależy przede wszystkim od parametrów płynu geotermalnego, a w szczególności od jego temperatury, stanu skupienia (para, ciecz) oraz właściwości fizykochemicznych (zasolenie).

W praktyce stosowane są dwa zasadnicze rodzaje elektrowni geotermalnych, tj. klasyczne oraz binarne, w których energia wydobytego płynu jest przekazywana do niezależnego czynnika roboczego, krążącego w obiegu zamkniętym siłowni. Orientacyjny zakres stosowania poszczególnych rozwiązań zaprezentowano w tabeli 3.2.1 (DiPippo 2005).

Tabela 3.2.1. Zakres stosowania poszczególnych rozwiązań elektrowni geotermalnych w zależności od temperatury wody geotermalnej (na podstawie DiPippo 2005, z uzupełnieniami)

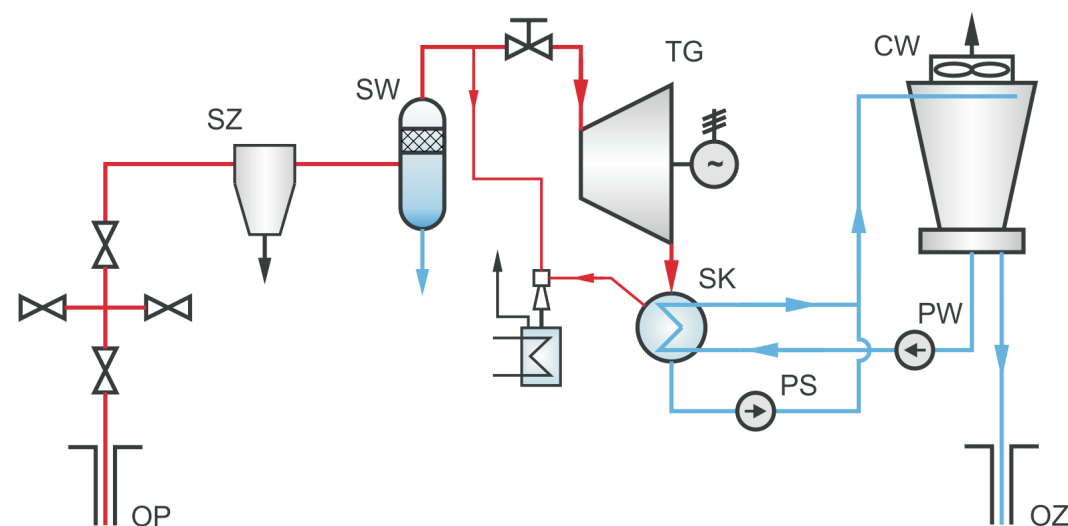
Table 3.2.1. Application scopes of individual geothermal power plant solutions depending on geothermal water temperature (after DiPippo 2005, with additions)

| Rodzaj elektrowni – zastosowany system                  | Temperatura wody [°C] |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|
| Klasyczna (parowa)                                      | 180–300               |
| Klasyczna z rozprężaniem jednostopniowym wody termalnej | 200–260               |
| Klasyczna z rozprężaniem dwustopniowym wody termalnej   | 150–320               |
| Binarna z czynnikiem pośrednim                          | 74–150                |

W elektrowniach klasycznych woda lub para geotermalna stanowi jednocześnie czynnik roboczy w obiegu elektrowni. W praktyce spotykane są dwa zasadnicze układy, zależne od rodzaju pozyskiwanego płynu geotermalnego. W przypadku eksploatacji suchej pary jest ona zagospodarowywana

w systemie w sposób bezpośredni, natomiast gdy eksploatowana jest mieszanina pary i cieczy lub ciecz wrząca (przegrzana), medium kierowane jest w pierwszej kolejności do instalacji rozprężającej, celem uzyskania – w wyniku procesu izentalpowego dławienia – mieszaniny pary suchej oraz cieczy.

Na rysunku 3.2.1. przedstawiono schematyczną budowę siłowni geotermalnej zaopatrywanej parą wodną nasyconą suchą lub przegrzaną. Para z otworu wydobywczego jest kierowana bezpośrednio na turbinę, skąd po ekspansji dopływa do skraplacza. Powstający kondensat zatłaczany jest do złoża. Rozwiązanie to jest ograniczone do nielicznych lokalizacji na świecie (DiPippo 2005).



Rys. 3.2.1. Schemat elektrowni geotermalnej na parę nasyconą suchą  
(na podstawie DiPippo 2005; Stachel 2013)

SZ – separator zanieczyszczeń, SW – separator wilgoci, TG – turbogenerator, SK – skraplacz, CW – chłodnia wentylatorowa, OP, OZ – otwór produkcyjny i zatłaczający, PS, PW – pompy

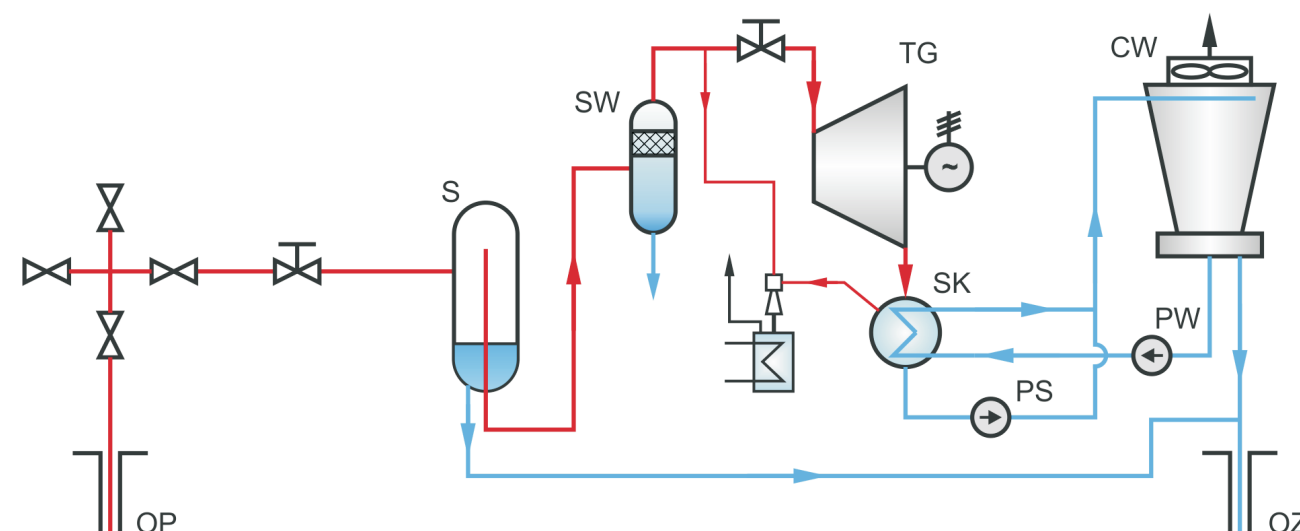
Fig. 3.2.1. Diagram of a geothermal dry saturated steam power plant (after DiPippo 2005; Stachel 2013)

SZ – dirt separator, SW – steam separator, TG – turbo generator, SK – condenser, CW – mechanical draft cooling tower, OP, OZ – production and injection wells, PS, PW – pumps

Rozwiązaniem bardziej skomplikowanym i stosowanym w wielu częściach świata są systemy bazujące na mieszaninie wody i pary geotermalnej, o odpowiednio wysokiej temperaturze, zwykle przekraczającej 200°C. W procesie rozprężenia wody do dwufazowego stanu ciecz–para, w wyniku obniżenia ciśnienia płynu poniżej ciśnienia nasycenia odpowiadającego temperaturze wody geotermalnej, uzyskuje się parę wodną nasyconą suchą. Para, po oddzieleniu cieczy w separatorze, jest kierowana do turbiny. W wyniku ekspansji w turbinie i po przejściu przez skraplacz, kondensat wraz z cieczą z separatora zatłaczane są do złoża. Systemy tego typu mogą być stosowane w układzie z rozprężaniem jednostopniowym (rys. 3.2.2) lub dwustopniowym.

Źródłem energii dla tego typu elektrowni są złoża wody i pary o odpowiednio wysokiej entalpii oraz odpowiednio wysokim strumieniu przepływu wody. Wysokotemperaturowe złoża pary wodnej występują przede wszystkim na obszarach obecnej lub niedawnej aktywności wulkanicznej i tektonicznej. Bezpośrednim źródłem ciepła jest energia zawarta w magmie usytuowanej płytko w skorupie ziemskiej lub dopływająca i wydobywająca się podczas erupcji wulkanicznych. Szczególnie sprzyjające warunki występują w rejonach stref ryftowych i subdukcji.

Odmienne w charakterze i możliwości zagospodarowania dla generacji prądu są złoża wód, których temperatura na wypływie z ujęcia jest niższa od 150°C. Niskotemperaturowe zasoby energii geotermalnej są stosunkowo powszechne i występują na znacznie większym obszarze globu. Zgromadzona w nich energia jest eksploatowana głównie w celu wykorzystania w elektrowniach klasycznych i w binarnych, w których wykorzystane są siłownie pracujące według organicznego obiegu Clausiusa-Rankinea (ORC, ang. *Organic Rankine Cycle*) lub według obiegu Kaliny.



Rys. 3.2.2. Elektrownia geotermalna z rozprężaniem jednostopniowym pary mokrej  
(na podstawie DiPippo 2005; Stachel 2013)

S – rozprężacz, SW – separator wilgoci, TG – turbogenerator, SK – skraplacz, CW – chłodnia wentylatorowa, OP, OZ – otwór produkcyjny i zatłaczający, PS, PW – pompy

Fig. 3.2.2. Geothermal power plant with single-stage wet steam expansion  
(after DiPippo 2005; Stachel 2013)

S – expander, SW – steam separator, TG – turbo generator, SK – condenser, CW – mechanical draft cooling tower, OP, OZ – production and injection wells, PS, PW – pumps

W obiegach tych jako czynnik roboczy stosowane są płyny o odpowiednio niskiej temperaturze wrzenia, niższej od temperatury wrzenia wody w zakresie ciśnień panujących w instalacji. W praktyce jako czynniki robocze mogą być stosowane:

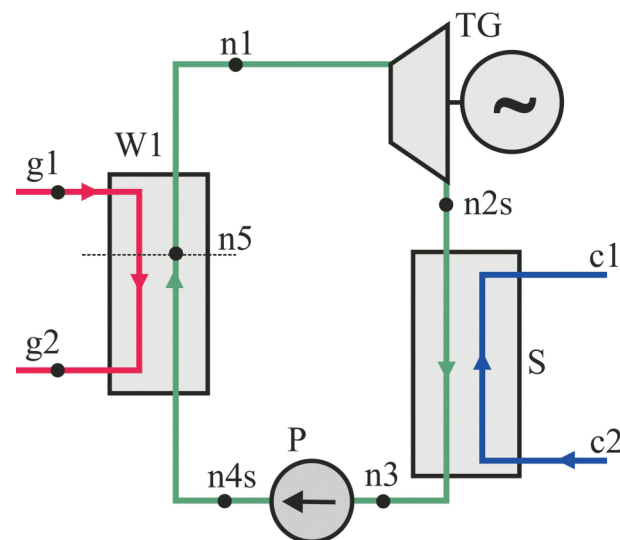
- ♦ substancje azeotropowe, charakteryzujące się tym, że proces odparowania i skraplania przebiega przy stałym ciśnieniu i temperaturze,
- ♦ substancje wieloskładnikowe, tzw. zeotropowe, dla których proces odparowania oraz skraplania przebiega przy stałym ciśnieniu i zmiennej temperaturze.

Czynnikiem roboczym stosowanym w obiegu Kaliny jest mieszanina amoniaku i wody o właściwościach zeotropowych.

### 3.2.1. Podstawy budowy układów ORC

W obiegu siłowni ORC (z ang. *Organic Rankine Cycle*, rys. 3.2.1.1) najczęściej stosowanymi płynami są substancje pochodzenia organicznego, w których parowanie i skraplanie czynnika roboczego przebiega izotermicznie i izobarycznie.





Rys. 3.2.1.1. Uproszczony schemat instalacji siłowni ORC

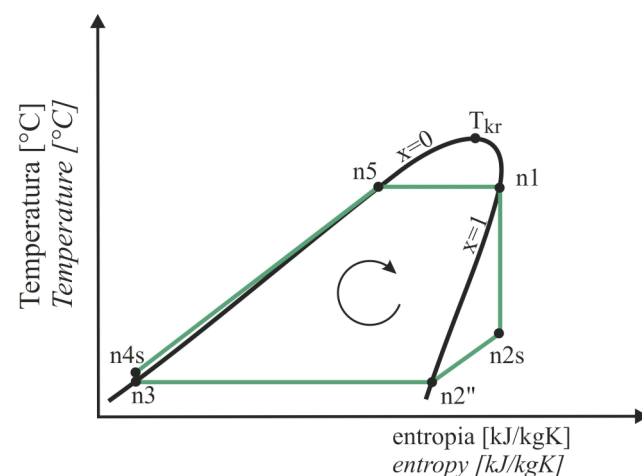
P – pompa, TG – turbogenerator, S – skraplacz, W1 – wymiennik ciepła, w którym realizowany jest proces podgrzewania, odparowania i ewentualnie przegrzewania czynnika roboczego, g1, g2 – otwór produkcyjny i zatłaczający, c1, c2 – obieg czynnika chłodzącego

Fig. 3.2.1.1. Simplified diagram of an ORC power plant

P – pump, TG – turbo generator, S – condenser, W1 – heat exchanger where the working fluid is heated, evaporated and possibly superheated, g1, g2 – production and injection wells, c1, c2 – refrigerant circuit

Bardzo istotną cechą elektrowni ORC jest możliwość wyboru płynu roboczego stosowanego w obiegu siłowni parowej. Kryteriów podziału czynników roboczych jest wiele, jednak pod względem termodynamicznym jedną z najistotniejszych jest kształt krzywych nasycenia płynu roboczego. Pod tym względem czynniki te można podzielić na dwie grupy: tak zwane czynniki suche i czynniki mokre (Badr i in. 1985), a rodzaj czynnika roboczego ma istotny wpływ na model obliczeniowy siłowni ORC.

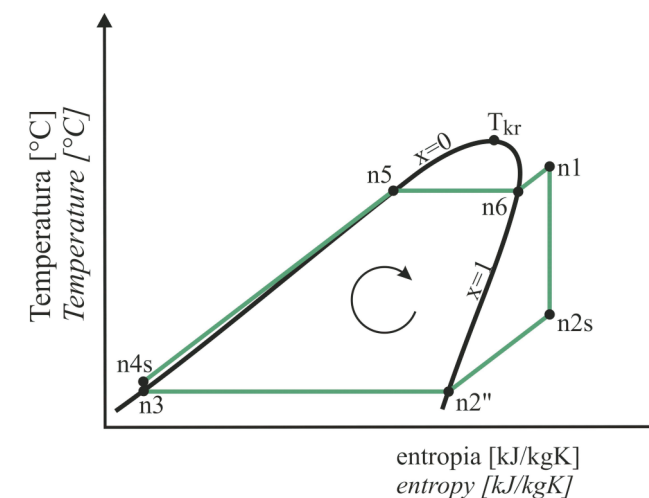
Na rysunku 3.2.1.2 przedstawiono cykl przemian realizowanych w obiegu siłowni ORC z czynnikiem suchym bez przegrzewania pary świeżej czynnika roboczego ( $n1-n2s-n2''-n3-n4s-n5-n1$ ),



Rys. 3.2.1.2. Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu siłowni ORC z czynnikiem suchym w wariantcie bez przegrzewania pary czynnika roboczego

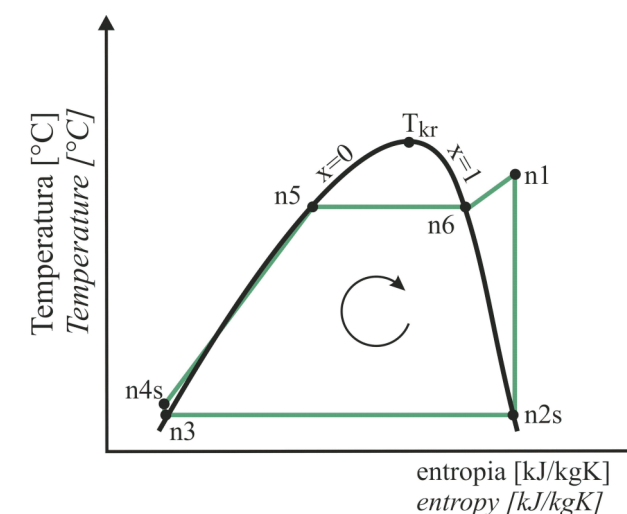
Fig. 3.2.1.2. Thermodynamic cycle implemented in an ORC power plant with dry fluid without overheating working fluid steam

natomiast na rysunku 3.2.1.3 zaprezentowano cykl przemian realizowanych w obiegu siłowni ORC z czynnikiem suchym z przegrzewaniem pary świeżej czynnika roboczego ( $n1-n2s-n2''-n3-n4s-n5-n6-n1$ ). Na rysunku 3.2.1.4 przedstawiono cykl przemian realizowanych w obiegu siłowni ORC z czynnikiem mokrym.



Rys. 3.2.1.3. Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu siłowni ORC z czynnikiem suchym, w wariantcie z przegrzewaniem pary czynnika roboczego

Fig. 3.2.1.3. Thermodynamic cycle implemented in an ORC power plant with dry fluid with overheating working fluid steam



Rys. 3.2.1.4. Cykl przemian termodynamicznych realizowanych w obiegu siłowni ORC z czynnikiem mokrym

Fig. 3.2.1.4. Thermodynamic cycle implemented in an ORC power plant with wet fluid

Kolejność przemian realizowanych w obiegu ORC wymieniono poniżej, przy czym niektóre z przemian – w zależności od wariantu – nie występują:

- ♦ przemiana  $n1 - n2s$ : izentropowe rozprężanie pary czynnika roboczego w turbinie,
- ♦ przemiana  $n2s - n2''$ : ochładzanie pary w skraplaczu,
- ♦ przemiana  $n2'' - n3$ : skraplanie pary w skraplaczu,
- ♦ przemiana  $n3 - n4s$ : izentropowe przetłaczanie czynnika roboczego za pomocą pompy obiegowej z izobary dolnej do izobary górnej,

- ♦ przemiana n4s – n5: podgrzewanie cieczy czynnika roboczego od temperatury skraplania do temperatury parowania,
- ♦ przemiana n5 – n6: odparowanie czynnika roboczego w wymienniku ciepła,
- ♦ przemiana n6 – n1: przegrzewanie czynnika roboczego w wymienniku ciepła.

Należy podkreślić, że przy stosowaniu czynników suchych ze względów eksploatacyjnych niewielkie przegrzanie czynnika roboczego (o 3-4K) jest wskazane, gdyż eliminuje problem wykrapłania się pary czynnika roboczego, a tym samym pojawiania się cieczy w turbinie, przez co polepszają się warunki jej pracy. Natomiast przy stosowaniu czynników mokrych przegrzewanie pary jest niezbędne. Wskazane jest, aby para na końcu procesu rozprężania w turbinie była parą przegrzaną lub parą nasyconą suchą.

### 3.2.2. Podstawy budowy systemu Kaliny

Ograniczony rozwój i zastosowanie systemu Kaliny na świecie wynikało do niedawna z faktu posiadania licencji na wykorzystanie tej technologii tylko przez amerykańską firmę Exergy Inc. (Ogrisec 2009). Swoistego rodzaju monopol wiązał się również z problemami w zakresie możliwości dostępu do autoryzowanego serwisu. Aktualnie, w związku z wykupieniem przez islandzką firmę Exorka licencji na obszar Europy, obserwuje się wzrost zainteresowania jej stosowaniem, zwłaszcza w przypadku eksploatacji zasobów wód termalnych o temperaturze niższej niż 120°C. O tym fakcie świadczą nowe inwestycje realizowane w Niemczech.

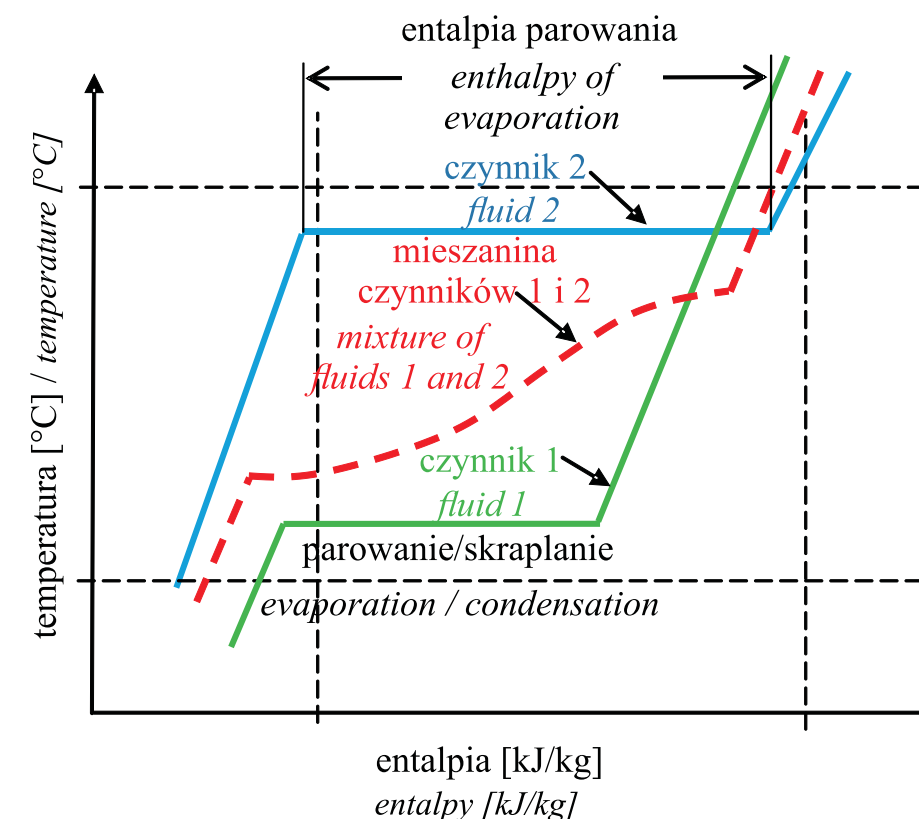
Cykl roboczy technologii Kaliny polega na wykorzystaniu mieszaniny dwóch mediów: wody i amoniaku. Dzięki właściwościom tego roztworu możliwe jest jego anizotermiczne parowanie i skraplanie. Porównanie sposobu parowania czynnika roboczego w obiegu ORC i Kalina przedstawiono schematycznie (rys. 3.2.2.1). Rysunek ten ma charakter poglądowy, ujmuje jednak istotę różnicy między obiegiem termodynamicznym ORC a cyklem Kaliny. Sposób parowania czynnika 2 odpowiada wodzie, a czynnika 1 amoniakowi – mieszanina czynników 1 i 2 to roztwór roboczy amoniaku w wodzie, na bazie której realizowany jest cykl Kaliny.

### 3.2.3. Porównanie układów technologicznych ORC i Kaliny

Zestawienie różnic wybranych parametrów istotnych dla eksploatacji i projektowania technologii binarnych ORC i Kaliny przedstawiono w tabeli 3.2.3.1. Na kolejnych rysunkach zaprezentowano schematy technologiczne instalacji siłowni pracujących według technologii ORC (rys. 3.2.3.1) i Kaliny (rys. 3.2.3.2).

Podstawowa różnica pomiędzy tymi technologiami polega na procesach generujących siłę napędową dla wytwarzania energii elektrycznej – czyli wytworzenia różnicy ciśnienia, która powoduje przepływ czynnika roboczego napędzającego turbinę. W przypadku technologii ORC parowanie i skraplanie czynnika roboczego przebiega izotermicznie i izobarycznie (rys. 3.2.3.1).

Technologia ORC jest zdecydowanie bardziej rozpowszechniona. Z dostępnej literatury wynika, że do 2009 r. na świecie działały tylko dwie siłownie geotermalne wykorzystujące system Kaliny (Ogrisec 2009) pozostałe instalacje to siłownie ORC. W roku 2012 do grupy siłowni geotermalnych pracujących w obiegu Kaliny dołączyła siłownia w Bruchsal (Niemcy) (Ganz i in. 2013). Ogólna liczba działających siłowni wykorzystujących system Kaliny (geotermalnych i innych) była szacowana do 2009 r. na 5 jednostek (Ogrisec 2009).



Rys. 3.2.2.1. Porównanie krzywych parowania dwóch czynników jednorodnych i ich mieszaniny (wg Pająk, Bujakowski 2013b)

Fig. 3.2.2.1. Comparison of evaporation curves for two homogeneous fluids and their mixture (after Pająk, Bujakowski 2013b)

Energetyczna efektywność produkcji energii elektrycznej w siłowniach binarnych jest uzależniona od temperatury medium napędowego (oddającego energię w parowaczu) oraz temperatury medium chłodzącego (odbierającego energię skraplania par czynnika). Im różnica temperatur między mediami jest większa, tym większa jest moc elektryczna i wyższa możliwa do uzyskania sprawność konwersji energii geotermalnej w energię elektryczną. Dzięki zastosowaniu odpowiednio niskiej temperatury dla źródła współpracującego ze skraplaczem możliwe jest znaczne obniżenie bariery technologicznej wymaganej temperatury zasobów energii geotermalnej pozwalających produkować energię elektryczną (Pająk, Bujakowski 2013b).

Parametry geotermalne, od których zależy efektywność pracy siłowni geotermalnej podzielić można na trzy umowne grupy (Pająk, Bujakowski 2013b):

1) parametry złożowe: temperatura złożowa, wydajność, mineralizacja i właściwości fizykochemiczne płynu złożowego, poziom zwierciadła statycznego, depresja jednostkowa, konstrukcja ujęcia (otworu) geotermalnego (średnica zarurowania, stosowanie zmienności średnicy otworu itp.). Parametry złożowe wpływają na poziom wymaganych nakładów inwestycyjnych i sprawność energetyczną siłowni binarnej;

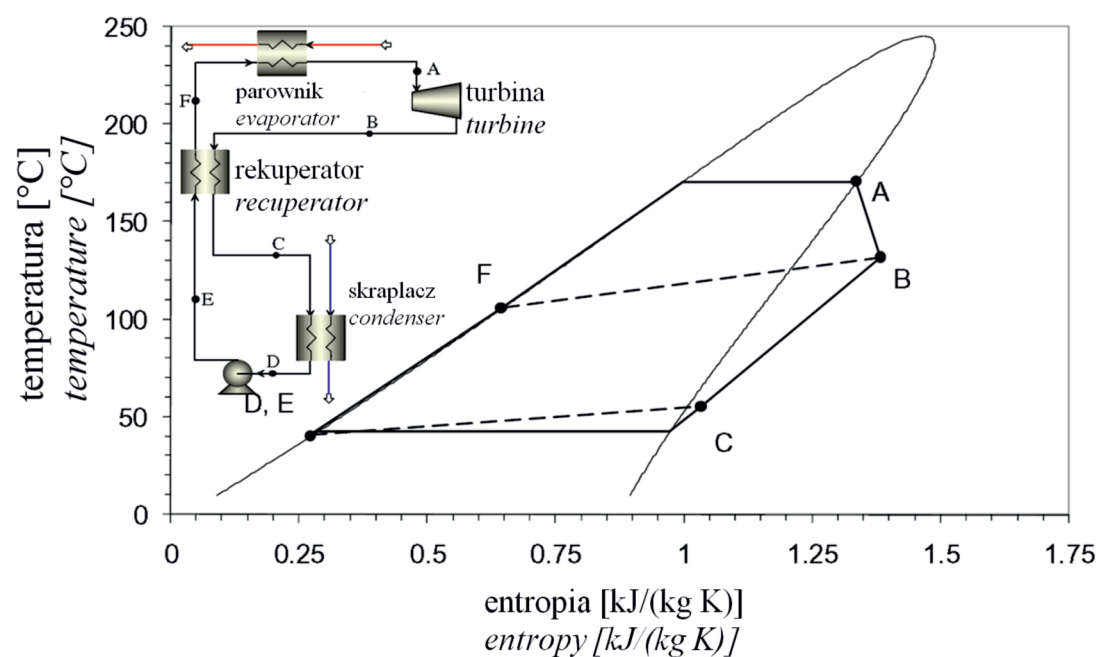
2) charakterystyka odbiorcy energii limituje możliwości efektywnego, najlepiej równoległego, zbytu wytwarzanej energii elektrycznej i pozyskiwanej energii cieplnej. Zbyt energii elektrycznej nie powinien stanowić problemu, ponieważ energia ta może być wprowadzana do krajowego systemu elektroenergetycznego w praktycznie dowolnych ilościach, przynajmniej w skali pojedynczej



Tabela 3.2.3.1. Podstawowe różnice pomiędzy technologiami ORC i Kaliny  
(na podstawie Pająk, Bujakowski 2013b)

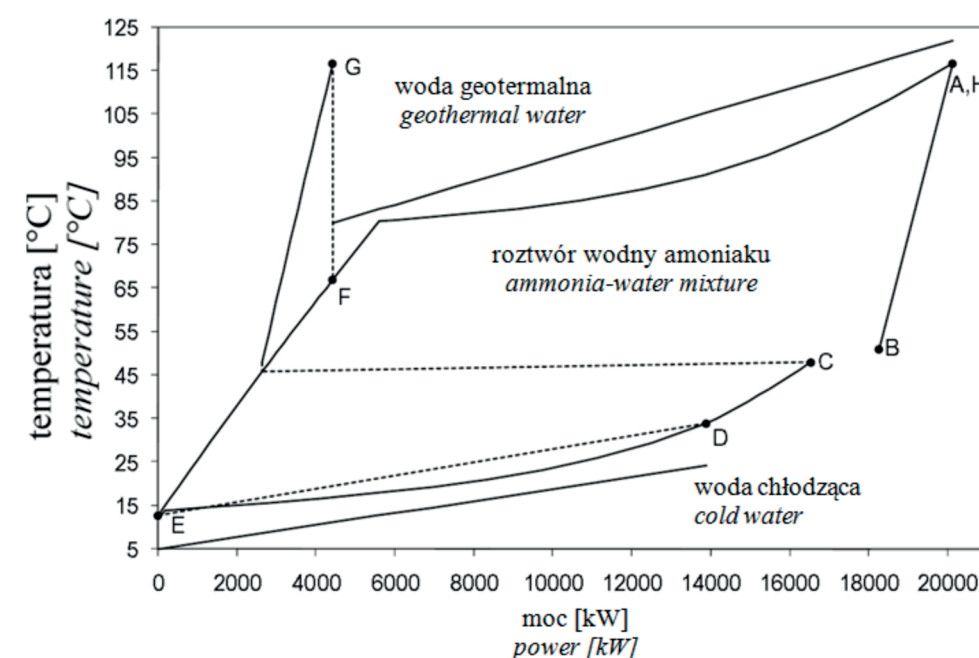
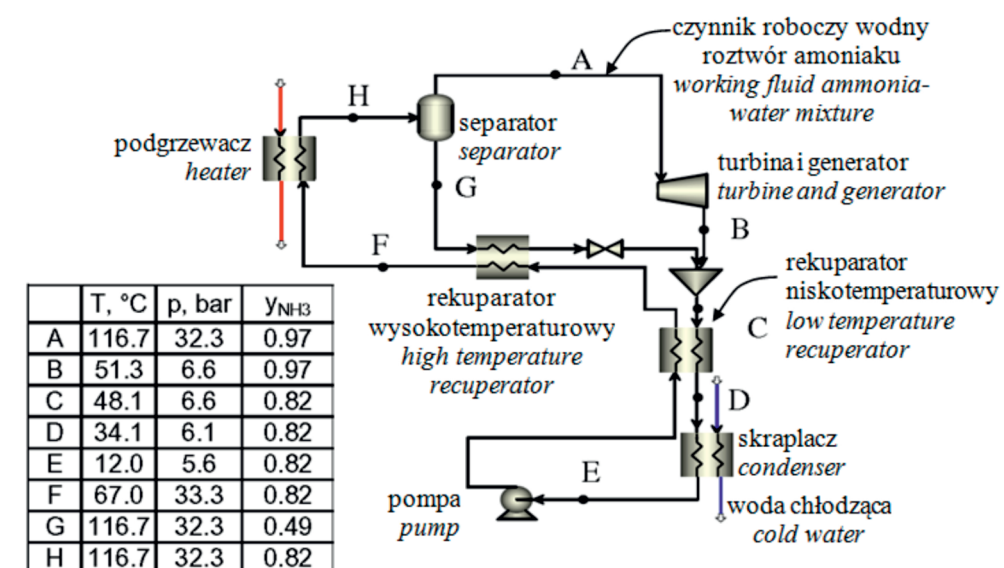
Table 3.2.3.1. Primary differences between the ORC and Kalina technologies  
(after Pająk, Bujakowski 2013b)

| Parametr                                                                                             | ORC                                                                                                                                      | Kalina                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generacja nieodwracalnych strat energii na wymiennikach                                              | duża                                                                                                                                     | mała – dzięki temu możliwe jest osiągnięcie przez czynnik roboczy temperatury zbliżonej do temperatury wejściowej czynnika dostarczającego energię do parowacza (np. wody termalnej)                                                                          |
| Standaryzacja stosowanych rozwiązań                                                                  | większość elementów instalacji musi być projektowana indywidualnie                                                                       | brak standaryzacji                                                                                                                                                                                                                                            |
| Stopień komplikacji obiegu termodynamicznego i jego dopasowanie do istniejących parametrów roboczych | prosty obieg.<br>Mała elastyczność i duża wrażliwość na zmiany parametrów roboczych, przede wszystkim temperatury parowania i skraplania | skomplikowany obieg, przynajmniej trzy parametry niezależne wymagane są dla ustalenia stanu układu.<br>Dzięki temu duża elastyczność pod względem dopasowania się systemu do parametrów roboczych. Możliwość zoptymalizowania pracy układu w danych warunkach |
| Regeneracja (odzysk) energii                                                                         | możliwa, chętnie i często stosowana                                                                                                      | znacząca, z reguły większy stopień odzysku energii niż w przypadku ORC                                                                                                                                                                                        |



Rys. 3.2.3.1 Przykładowy układ technologiczny siłowni pracującej w obiegu ORC wraz ze szkicem obiegu roboczego w układzie współrzędnych temperatura–entropia właściwa czynnika roboczego  
(Bombarda i in. 2010; Pająk, Bujakowski 2013b)

Fig. 3.2.3.1. Specimen technological diagram of an ORC power plant with an operating cycle diagram showing working fluid thermal capacitance as a function of temperature  
(Bombarda et al. 2010; Pająk, Bujakowski 2013b)



Rys. 3.2.3.2. Przykładowy układ technologiczny siłowni pracującej w obiegu Kaliny wraz ze szkicem obiegu roboczego w układzie współrzędnych temperatura–moc  
(Bombarda i in. 2010; Pająk, Bujakowski 2013b)

Fig. 3.2.3.2. Specimen technological diagram of a Kalina cycle power plant with an operating cycle diagram showing power as a function of temperature

instalacji. Problemem może okazać się możliwość zagospodarowania energii cieplnej, której powstaje znacznie więcej niż energii elektrycznej (tab. 3.2.3.1.);

3) charakterystykę odbiornika energii niskotemperaturowej skojarzonego ze skraplaczem siłowni. Odbiornikiem tym może być: instalacja ciepłownicza, powietrze atmosferyczne lub woda z cieków powierzchniowych. Sprawność konwersji energii geotermalnej w energię elektryczną będzie tym większa im większą pojemnością cieplną i niższą temperaturą cechował się będzie odbiornik współpracujący ze skraplaczem. Dobrym odbiornikiem energii ze skraplacza elektrowni są wody powierzchniowe rzek i strumieni. Źródła te cechują się w miarę wyrównaną i niską średnią roczną tem-

peraturą. Dodatkowo przejmowanie ciepła przez wodę jest bardziej intensywne niż przejmowanie przez powietrze, co redukuje rozmiary skraplacza. Powietrze atmosferyczne, obok mniejszej intensywności odbioru energii, charakteryzuje się większą zmiennością temperatury w ciągu roku, co nie jest korzystne dla pracy siłowni binarnej. Jego wykorzystanie może okazać się konieczne dla niektórych lokalizacji, np. ze względu na brak dostępu do wód powierzchniowych.

Niewątpliwą zaletą geotermalnej siłowni binarnej, w porównaniu z innymi instalacjami wytwarzającymi energię elektryczną opartą na odnawialnych źródłach energii, a w szczególności w porównaniu z energią wiatrową i energią słoneczną, jest jej pełna dyspozycyjność (niezależność od warunków klimatycznych). W efekcie wysoce prawdopodobna jest możliwość produkcji znaczącej ilości energii elektrycznej w przeliczeniu na jednostkę mocy zainstalowanej, co powinno znacząco poprawić ekonomiczną efektywność instalacji geotermalnej siłowni binarnej, w porównaniu z wymienionymi OZE.

### 3.3. Binarne elektrownie geotermalne – przegląd doświadczeń

Według stanu na koniec 2010 r., na całym świecie istniało 236 elektrowni geotermalnych, opartych na organicznym obiegu Rankine’a lub według cyklu Kaliny (Bertani 2010). Wybrane, największe jednostki na tle mapy świata zaprezentowano w załączniku 3.1.

Najwięcej instalacji z obiegiem organicznym zbudowano w Stanach Zjednoczonych Ameryki (149 instalacji binarnych o łącznej mocy zainstalowanej 653 MW<sub>el</sub>; Bertani 2010), głównie w Utah, Nevadzie i Kalifornii oraz w Nowej Zelandii (24 instalacje). Elektrownie binarne wykorzystujące cykl Kaliny eksploatowane są na Islandii (w Husaviku) i w Niemczech (Unterhaching, Bruchsal). Szczególnie intensywny rozwój wykorzystania technologii binarnych odnotowano ostatnio w Niemczech. Na koniec 2012 roku, całkowita moc zainstalowana w systemach ORC i Kaliny wyniosła tutaj ogółem 12,1 MW<sub>e</sub> (Ganz i in. 2013), a produkcja prądu osiągnęła w 2012 r. wielkość 25,4 GWh. W 2013 r. zaplanowano uruchomienie instalacji w Dürrnhaar, Kirchstockach, Sauerlach. Trwają prace na budowę kolejnych, w Kirchweidach, Taufkirchen, Traunreut, Brühl, Groß Schönebeck (Ganz i in. 2013). Ostatecznie, do roku 2015 rozwój energetyki geotermalnej w Niemczech pozwoli na osiągnięcie około 60 do 70 MW<sub>e</sub> mocy. Ten fakt jest szczególnie interesujący, z uwagi na zbliżone uwarunkowania geologiczno-złożowe Polski.

Pierwszą siłownię binarną uruchomili Rosjanie na Kamczatce w 1967 roku (Lund 2004); miała ona moc elektryczną 680 kW<sub>e</sub> i produkowała energię z wód o temperaturze 81°C. Pracowała, opierając się na technologii ORC, wykorzystując czynnik roboczy R-12 (freon o nazwie dichlorodifluorometan).

W Polsce opracowano i uruchomiono laboratoryjną instalację siłowni binarnej ORC, pracującą dzięki poborowi energii z wody obiegu ciepłowniczego (Nowak i in. 2010). Instalacja ta zasilana jest wodą sieciowego obiegu ciepłowniczego, a temperatura wody zasilającej symuluje możliwą do osiągnięcia temperaturę płynów geotermalnych w polskich warunkach geologicznych (Pająk, Bujakowski 2013a).

Światowe doświadczenia dotyczące wykorzystania siłowni binarnych są już dość szerokie. Z informacji literaturowych wynika, że instalacją produkującą energię elektryczną z wód o najniższej temperaturze jest instalacja zlokalizowana w Chena Hot Springs na Alasce (Bertani 2012). Produkuje

ona energię elektryczną z wód o temperaturze 74°C, przy wydajności 32 litrów/s (~32 kg/s). Moc elektryczna zainstalowana w siłowni wynosi 200 kW (Lund 2005) (225 kW wg: Bertani 2012). Erkan i in. (2008) wspominają o możliwości produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu siłowni binarnej z płynów geotermalnych o temperaturze 57°C; informacja ta nie dotyczy jednak instalacji działającej lecz inwestycji znajdującej się w sferze rozważań projektowych (Pająk, Bujakowski 2013b). W tabeli 3.3.1 zestawiono najbardziej istotne parametry eksploatacyjne wybranych siłowni binarnych znanych z literatury.

Tabela 3.3.1. Zestawienie parametrów wybranych instalacji działających na świecie  
(na podstawie Pająk, Bujakowski 2013b)

Table 3.3.1. Summary of parameters of selected plants operating worldwide  
(after Pająk, Bujakowski 2013b)

| Parametr                                                            | Lokalizacja elektrowni   |                        |                         |                        |                          |                                                |                                    |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                     | Altheim<br>wg 1 i 3      | Bad-Blumau<br>wg 1 i 2 | Husavik<br>wg 4 i 9     | Neustad-Glewe*<br>wg 2 | Underhaching<br>wg 5 i 6 | Chena Hot<br>Springs,<br>Alaska<br>wg 3, 7 i 8 | Bruchsal<br>wg: 10, 11,<br>12 i 13 |
|                                                                     | Niemcy                   | Austria                | Islandia                | Niemcy                 | Niemcy                   | USA                                            | Niemcy                             |
| Temperatura wody geotermalnej na wlocie do instalacji binarnej [°C] | 106                      | 110                    | 121                     | 98                     | 120                      | 74                                             | 122                                |
| Strumień płynu geotermalnego [kg/s]                                 | 81,7                     | 80,0                   | 95,0                    | 30,6                   | 150,0                    | 32,0                                           | 25,0                               |
| Moc elektryczna (b – brutto, n – netto, i – zainstalowana) [kW]     | 1000 (i)<br>500 (n)      | 250 (i)<br>180 (n)     | 1823 (i)<br>1700 (n)    | 210 (b)                | 3360 (n)                 | 200 (i)                                        | 500 (i)                            |
| Moc cieplna [MW]                                                    | 9                        | ~5                     | 44                      | 6                      | 40                       | ?                                              | 5,5                                |
| Stosowana technologia                                               | ORC                      | ORC                    | Kaliny                  | ORC                    | Kaliny                   | ORC                                            | Kaliny                             |
| Rodzaj niskotemperaturowego źródła energii                          | woda z górskiego potoku  | chłodnie wentylatorowe | woda z górskiego potoku | chłodnie wentylatorowe | chłodnie wentylatorowe   | woda z rzeki                                   | chłodnie wentylatorowe             |
| Temperatura niskotemperaturowego źródła energii [°C]                | 10 (podgrzewana do 18°C) | ~10                    | 4                       | ~10                    | ~10                      | 4                                              | ~10                                |

Źródło informacji umieszczonych w tabeli: 1) (Pernecker, Uhlig 2003), 2) (Lund, Chiasson, 2007), 3) (Bertani, 2012), 4) (Hjarnarsson, 2005), 5) (Knapek, Kittl, 2007), 6) (Businessweek, 2008), 7) (Alaska Energy Authority, 2007), 8) (Lund, 2005), 9) (Valdimarsson, 2003), 10) (Ganz i in., 2013), 11) (Enpros, 2013), 12) (Think Geoenergy, 2013), 13) (Bracke, 2012)

\* Turbina została w 2012 r. zdemontowana (Ganz i in. 2013).

Rozmieszczenie funkcjonujących na świecie instalacji binarnych jest nierównomierne i zależy bezpośrednio od uwarunkowań geologicznych, ale również od poziomu rozwoju gospodarczego,



polityki energetycznej i środowiskowej. Niebagatelną rolę odgrywają systemy różnego rodzaju wsparcia finansowego, zależne od polityki ekonomicznej i świadomości społecznej.

W Ameryce Północnej wytwarzanie energii elektrycznej odbywa się przy wykorzystaniu technologii ORC w elektrowniach geotermalnych, których łączna moc zainstalowana wynosi 653 MW<sub>e</sub> (Bertani 2010). Instalacje zlokalizowane są głównie w obszarach wysokotemperaturowych pól geotermalnych, występujących w rejonach czynnego wulkanizmu. Źłoża geotermalne wykazują tutaj temperaturę rzędu 125–208°C. W instalacjach stosujących system ORC, jako czynniki robocze wykorzystywane są głównie izobutan i izopentan, a temperatura wody lub mieszaniny pary i wody (płynu dwufazowego) na dopływie do instalacji waha się w zakresie 73–188°C (Bertani 2010, 2012; Bloomquist 2004; Boyd 2002; Boyd, DiPippo 2012; Kaczmarczyk 2011; Lund 1999; Lund i in. 2010; Schochet 2000; Schochet i in. 2004, 2012; Sones, Krieger 2000; Sonnelitter i in. 2000).

Na obszarze Ameryki Środkowej eksploatowane są elektrownie z obiegiem organicznym o łącznej mocy zainstalowanej 85,4 MW<sub>e</sub> (Bertani 2010). Są to instalacje zasilane z wysokotemperaturowych źródeł geotermalnych o temperaturach złożowych 240–300°C i temperaturze wydobywanej na powierzchnię wody, lub mieszaniny pary i wody, rzędu 155–182°C. Stosowane czynniki robocze to n-pentan i izobutan (Bertani 2010, 2012; Asturias 2008; DiPippo 2012; Enrique, Porras 2006; Gutiérrez-Negrín i in. 2010; Lund 1999; Moya, DiPippo 2007; Kaczmarczyk 2011; Moya i in. 2012).

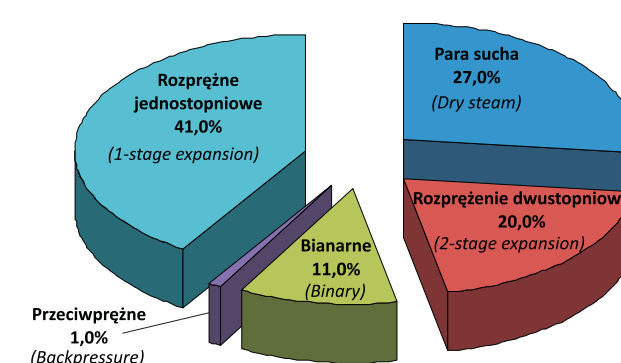
Łączna moc zainstalowana w 4 elektrowniach binarnych znajdujących się na obszarze kontynentu Afrykańskiego wynosi 21 MW<sub>e</sub> (Bertani 2010). Czynniki robocze stosowanymi w systemach ORC są izopentan i pentan. Instalacje geotermalne zasilane są mieszaniną pary i wody geotermalnej, cechujących się wysoką temperaturą, która na dopływie do elektrowni wynosi 170–188°C. Temperatura złożowa waha się w granicach 220–320°C (Bertani 2010, 2012; Gebregiorgis 2007; Kaczmarczyk 2011; Mwakio 2009; Reshef, Citrin 2003; Sutter i in. 2012).

W Australii i Oceanii łączna moc zainstalowana w tego typu elektrowniach wynosi 138,17 MW<sub>e</sub> (Bertani 2010), a najczęściej stosowanymi czynnikami roboczymi są izopentan i pentan. W Nowej Zelandii, 12 elektrowni geotermalnych typu ORC, zlokalizowanych w obszarach wysokiej aktywności wulkanicznej zasilane jest głównie parą oraz mieszaninami pary i wody. Ich temperatura złożowa wynosi 220–320°C. Temperatury eksploatowanego medium na dopływie do instalacji wahają się w zakresie od 172–270°C. W przypadku Australii, zasoby źródeł geotermalnych osiągają temperaturę nie przekraczającą 250°C. W systemach binarnych opartych na technologii ORC z czynnikiem roboczym w postaci izopentanu, wykorzystywana jest woda o temperaturze wynoszącej około 98°C (Bertani 2010, 2012; DiPippo 2012; Dunstall 1999; Kaczmarczyk 2011; Legmann, Sullivan 2003; Lund 1999; Lund i in. 2010).

Na obszarze Azji moc zainstalowana, według stanu na rok 2010, wynosiła około 170 MW<sub>e</sub> (Bertani 2010). Instalacje te zasilane są wodą termalną lub mieszaniną pary i wody termalnej, o temperaturach od 89 do około 150°C. Brak natomiast pełnych danych o rodzaju stosowanych czynników roboczych (Bertani 2010, 2012; Kaczmarczyk 2011; DiPippo 2008; Low, Morris 2000; Taylor, Zheng 1996; Ming-Lung, Yuan-Kung 2006; Jiyang 1992; Battocletti, Zheng 2000). Dodatkowo w azjatyckiej części Turcji wykonanych zostało 11 instalacji o łącznej mocy zainstalowanej 190 MW<sub>e</sub>, w tym 90,2 MW<sub>e</sub> to nowe instalacje, których uruchomienie zaplanowane było na koniec 2013 r. (Kaplan, Umran 2010; Mertoglu i in. 2010; Parlaktuna i in. 2013; Serpen i in. 2010).

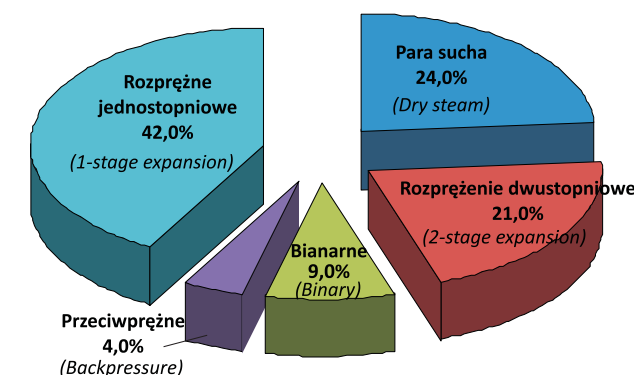
Na kontynencie europejskim wykonano dotychczas szereg instalacji binarnych, których łączna moc zainstalowana, według stanu na rok 2013, wynosiła 67,55 MW<sub>e</sub>, w tym 3 instalacje o łącznej mocy 5,91 MW<sub>e</sub> pracują oparte na cyklu Kaliny. Kolejne 5 instalacji w Niemczech, których moc zainstalowana wyniesie 20,2 MW<sub>e</sub> jest w budowie (Ganz i in. 2013) (zał. 3.1). Czynniki robocze stosowanymi w systemach ORC są izopentan, pentan, n-pentan, izobutan, zaś w cyklu Kaliny mieszanina amoniaku z wodą. Instalacje europejskie wykorzystują zarówno nisko-, średnio-, jak i wysokotemperaturowe zasoby energii geotermalnej o temperaturach złożowych w zakresie od 80,5 do 240°C (Bertani 2010, 2012, 2013; Boissavy i in. 2013; Cabeças i in. 2010; Carvalho i in. 2013; Ganz i in. 2013; Goldbrunner 2005, 2009, 2010; Goldbrunner, Goetzl 2013; Hjartarsson 2005; Kaplan 2007; Knappek, Kittl 2007; Legmann 2003; Lund 2005; Pernecker, Uhlig 2003; Ragnarsson 2010 i 2013; Richter 2010; Rosca i in. 2013; Thorolfsson 2005).

Większość pracujących na świecie elektrowni geotermalnych wykorzystuje płyny geotermalne (para, woda) o wysokim ciśnieniu i temperaturze. Liczba elektrowni bazujących na nośnikach energii o temperaturze mniejszej niż 150°C jest stosunkowo niewielka i liczy zaledwie kilkadziesiąt jednostek produkcyjnych. Pod względem wielkości mocy zainstalowanej i jednocześnie produkcji energii elektrycznej największy udział mają konwencjonalne siłownie parowe z jednostopniowym rozprężaniem (odpowiednio 41% i 42%, moc średnia 31,4 MW), a następnie – instalacje na parę nasyconą suchą (odpowiednio 27% i 24%, moc średnia 46,4 MW) i parę moką z dwustopniowym rozprężaniem (odpowiednio 20% i 21%, moc średnia 34,3 MW) (rys. 3.3.1–3.3.3).



Rys. 3.3.1. Struktura mocy zainstalowanej w zależności od rodzaju elektrowni (na podstawie Bertani 2010; Stachel 2013)

Fig. 3.3.1. Structure of installed capacity depending on power plant type (after Bertani 2010; Stachel 2013)

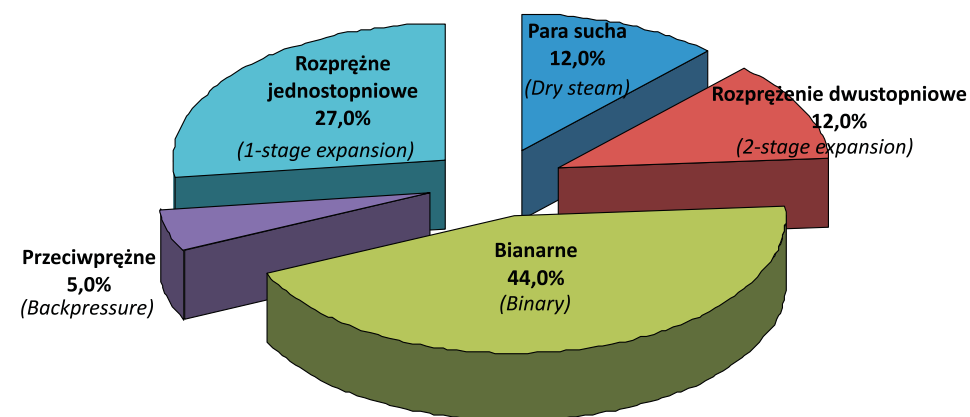


Rys. 3.3.2. Struktura produkcji energii w zależności od rodzaju elektrowni (na podstawie Bertani 2010; Stachel, 2013)

Fig. 3.3.2. Structure of energy production depending on power plant type (after Bertani 2010; Stachel 2013)

Udział elektrowni z czynnikiem pośrednim – tzw. binarnych – jest niewielki, pomimo znaczącej ich ilości. Z analizy ilościowej poszczególnych rodzajów elektrowni geotermalnych wynika, że najwięcej jednostek wytwórczych dotyczy tzw. siłowni binarnych, które stanowią 44% wszystkich instalacji, przy czym ich udział w mocy zainstalowanej wynosi 11%, a w produkcji energii elektrycznej tylko 9% (rys. 3.3.3) (Bertani 2010). Wynika stąd, że ze względu na ilość wytwarzanej energii elektrycznej oraz średnią produkcję energii przypadającą na jedną jednostkę wytwórczą, najbardziej efektywne są elektrownie pracujące z bezpośrednim wykorzystaniem pary geotermalnej, niezależnie od sposobu jej pozyskiwania.





Rys. 3.3.3. Struktura ilości jednostek wytwórczych w zależności od rodzaju elektrowni (na podstawie Bertani 2010, Stachel 2013)

Fig. 3.3.3. Structure of the number of generation units depending on power plant type (after Bertani, 2010, Stachel 2013)

Większość pracujących na świecie elektrowni wykorzystujących system ORC jest zasilana zasobami wysokotemperaturowych złóż pary, wody lub mieszaniny pary i wody, co jest związane z lokalizacją tych instalacji na terenach o dużej aktywności wulkanicznej i tektonicznej. Na rysunku 3.3.4



Ryc.3.3.4. Siłownia geotermalna Svartsengi (Islandia) (a) i jej widok na tle kąpieliska „Blue Lagune” (b). Klasyczna turbina na parę geotermalną (c) i obieg ORC (d) (fot. B. Tomaszewska 2012)

Fig. 3.3.4. Svartsengi geothermal power plant (Iceland) (a) and power plant as seen in the background of the “Blue Lagoon” bathing resort (b). Classic geothermal steam turbine (c) and ORC turbine (d) (photo: B. Tomaszewska 2012)

zaprezentowano zdjęcia siłowni geotermalnej Svartsengi (Islandia), wykorzystującej – obok klasycznej turbiny na parę geotermalną (temp. 230°C) – obiegi ORC. Zainstalowana moc turbiny na parę wynosi 30 MW<sub>e</sub>. Z kolei, widoczna na rysunku 3.3.4d turbina i generator stanowią turbozespół ORC o mocy elektrycznej 1,2 MW<sub>e</sub> napędzany wodą o temp. około 95°C. Instalacja ta stanowi przykład kompleksowego zagospodarowania wód/pary geotermalnej w celach energetycznych i rekreacyjnych. Wykorzystana w elektrowni geotermalnej woda termalna kierowana jest tutaj do niecek rekreacyjnych kompleksu Blue Lagune (rys. 3.3.4.b). Walory balneologiczne tej wody są powszechnie znane, a kosmetyki produkowane na jej bazie, uznane zostały na całym świecie.

Wybrane instalacje zasilane wodą geotermalną o temperaturze poniżej 135°C zestawiono w tabeli 3.3.2. Temperatura wody zasilającej systemu przedstawione w tabeli 3.3.2 jest zbliżona do spotykanych w Polsce. Sugeruje to, że również w naszym kraju możliwe jest wykorzystanie zasobów energii geotermalnej i budowa elektrowni opartej na systemie ORC lub Kaliny.

Tabela 3.3.2. Wybrane elektrownie geotermalne ORC i Kaliny zasilane wodą o niskiej entalpii (na podstawie Bertani 2010, 2012; DiPippo 2012; Ganz i in. 2013; Goldbrunner, Goetzl 2013; Legmann 2003; Lund i in. 2010)

Table 3.3.2. Selected ORC and Kalina geothermal plants fed with low enthalpy water (after Bertani 2010, 2012; DiPippo 2012; Ganz et al. 2013; Goldbrunner, Goetzl 2013; Legmann 2003; Lund et al. 2010)

| Elektrownia      | Kraj    | Moc elektryczna [kW <sub>e</sub> ] | Temperatura zasilania [°C] | Wydajność [m <sup>3</sup> /h] | Czynnik roboczy     |
|------------------|---------|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------|
| System ORC       |         |                                    |                            |                               |                     |
| Bad Blumau       | Austria | 180                                | 110                        | 108                           | izopentan           |
| Althaim          | Austria | 500                                | 106                        | 290                           | dichlorofluorometan |
| Simbach          | Niemcy  | 200                                | 80                         | 223                           | R134a               |
| Neustadt Glewe   | Niemcy  | 210                                | 98                         | 40–110                        | n-perfluoropentan   |
| Amadee           | USA     | 1600/800                           | 104                        | 738                           | R114                |
| Chena Hot Spring | USA     | 730                                | 73,3                       | 120                           | R134a               |
| Caspar           | USA     | 250/180                            | 76,6                       | 265                           | izopentan           |
| System Kaliny    |         |                                    |                            |                               |                     |
| Bruchsal         | Niemcy  | 550                                | 120                        | 86,4                          | woda+amoniak        |
| Unterhaching     | Niemcy  | 3360                               | 122                        | 540                           | woda+amoniak        |
| Taufkirchen*     | Niemcy  | 4300                               | 135                        | 432                           | woda+amoniak        |

\* W budowie

Jednym z takich rozwiązań, charakteryzującym się zbliżonymi parametrami eksploatacyjnymi do spodziewanych w naszym kraju, według organicznego obiegu Clausiusa-Rankinea, jest uruchomiona w 2003 roku instalacja w Neustadt-Glewe (Niemcy) (rys. 3.3.5) (Kaplan 2007). Jej moc zainstalowana wynosi 210 kW<sub>e</sub>, a zasilana jest wodą termalną o temperaturze 98°C i mineralizacji około 220 g/dm<sup>3</sup>. Woda wydobywana jest z głębokości 2100–2300 m p.p.t. Innym przykładem zastosowania tech-



nologii ORC jest oddana do użytku w 2000 roku elektrownia w Altheim (Austria) o mocy 500 kW<sub>e</sub>, zasilana wodą o temperaturze 106°C, wydobywaną z głębokości 2360 m p.p.t. (Pernecker, Uhlig 2003).



Rys. 3.3.5. Część główna elektrowni geotermalnej w Neustadt Glewe, moc  $N_{el} = 210$  kW  
(foto: A. Stachel)

Fig. 3.3.5. Central unit of the geothermal power plant in Neustadt Glewe, power rating:  $N_{el} = 210$  kW  
(photo: A. Stachel)

Przykładem komercyjnego zastosowania obiegu Kaliny do produkcji energii elektrycznej z użyciem niskotemperaturowego źródła geotermalnego jest elektrownia w Unterhaching (Niemcy).

Ciepłownia geotermalna oddana została do użytku w roku 2007, a elektrownia w 2009 roku (Knappek, Kittl 2007). Jest to instalacja wytwarzająca energię elektryczną i ciepło w kogeneracji. Charakteryzuje się mocą elektryczną 3,4 MW<sub>e</sub> oraz mocą cieplną 38 MW<sub>t</sub> (rys. 3.3.6). Elektrownia wykorzystuje

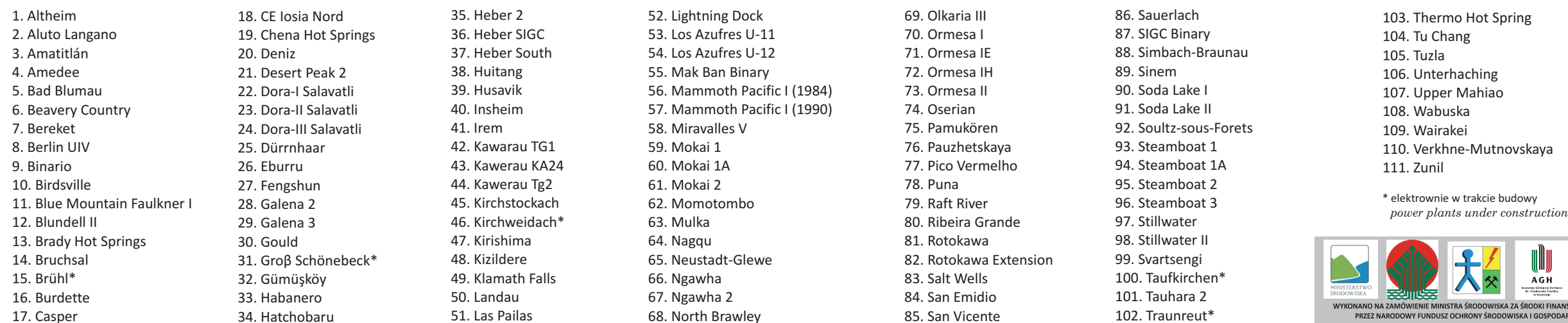


Rys. 3.3.6. Widok na elektrownię geotermalną w Unterhaching oraz ujęcie eksploatacyjne  
(foto: B. Tomaszewska 2013)

Fig. 3.3.6. Geothermal power plant in Unterhaching and its production well (photo: B. Tomaszewska 2013)

zasoby wód termalnych o niskiej mineralizacji (Vetter 2012), pozyskiwane otworem wydobywczym (GtUha-1a) z głębokości 3350 m. Temperatura eksploatowanej wody wynosi 122°C, a wydajność ujęcia 540 m<sup>3</sup>/h. Wykorzystana, schłodzona do temperatury około 60°C woda termalna jest wtłaczana do górotworu otworem chłonnym (GtUha-2) na głębokość 3580 m p.p.t. (Knappek, Kittl 2007; Stachel 2013).

**Zał. 3.1**  
*Encl. 3.1*





## Summary – Review of technologies and geothermal power plants

*The first installation to generate electricity from geothermal energy was constructed in Larderello, Italy (Tuscany), where a commercial plant using rich geothermal resources of dry steam in the region, overall capable of generating 250 kW<sub>e</sub> of power, became operational in 1911. When a 50 MW<sub>e</sub> power plant commenced operation in New Zealand in 1957, the Larderello station was the only plant worldwide generating electric power from geothermal energy (DiPippo 2005).*

*Currently, geothermal power plants are operating in 25 countries. In 2010, their total installed power was expected to reach approximately 10,715 MW<sub>e</sub>, compared to annual electricity production of 67,246 GWh (Bertani 2010). Among the leaders intensively developing the sector and managing the highest levels of installed power are the United States, the Philippines, Indonesia, Mexico, Italy, Iceland and Japan (Tab. 3.1.1). In December 2012, the electric power of all the geothermal power plants had already reached 11,130.6 MW<sub>e</sub>, exhibiting a 3.9% growth compared with 2010 (IGA News 2012).*

*A geothermal power plant consists of two coupled systems, a geothermal energy acquisition system and energy usage system (Nowak et al. 2008). In fact, two major types of geothermal power plants are used, i.e. classic and binary ones, where the energy from the extracted liquid is passed to an independent operating medium circulating in the closed circuit of the generator. High-level applications of specific solutions are presented in Table 3.2.1 (based on DiPippo 2005).*

*In classic power plants, water or geothermal vapour simultaneously serve as the operating media circulating in the plant. Two systems are the most popular, their application depending on the type of geothermal fluid being obtained. In the case of the usage of dry vapour, the steam is processed directly in the system; when a mixture of vapour and boiling (overheated) liquid is utilised, it is first directed to a decompression unit in order to obtain (through isenthalpic throttling) a mixture of dry vapour and liquid.*

*Low-temperature resources of geothermal energy (below 150°C) are relatively common, they can be found on much larger areas of the planet. They are used in binary power plants operating according to organic Clausius-Rankine (ORC) or Kalina cycles. Operating media in the above-men-*

*tioned cycles are liquids characterised by an adequately low boiling point, lower than the boiling point of water in the pressure conditions present in the installation. In practice, the following substances can be used as operating media:*

- ♦ azeotropic substances, characteristic of the constant pressure and temperature of the condensation and vaporisation processes,*
- ♦ multi-component substances, so called zeotropic mixtures, for which vaporisation and condensation processes occur with constant pressure and changing temperature.*

*The operating medium used in the Kalina cycle is a zeotropic mixture of ammonia and water. A list of differences in selected parameters, significant for the operation and design of ORC and Kalina binary technologies, are presented in Table 3.2.3.1. In the following figures, technological diagrams of the power plants operating according to the ORC (Fig. 3.2.3.1) and Kalina (Fig. 3.2.3.2) technologies are detailed.*

*The basic difference between the ORC and Kalina technologies resides in the power generation processes used to produce electricity, namely in creating a pressure difference which drives the flow of the operating medium powering the turbine. In the case of the ORC technology, the operating medium vaporisation and condensation is isothermal and isobaric (Fig. 3.2.3.1).*

*As of the end of 2010, there were 236 geothermal power plants completed worldwide, operating according to the organic Rankine or Kalina cycles (Bertani 2010). The selected major stations projected on a world map are presented in Appendix 3.1.*

*Most installations operating the organic circulation were completed in the United States of America (149 binary installations, 653 MW<sub>e</sub> of total installed power; Bertani 2010), mainly in Utah, Nevada and California, as well as in New Zealand (24 installations). Binary power plants using the Kalina cycle are operational in Iceland (in Husavik) and Germany (Unterhaching, Bruchsal). A very intensive growth of binary technologies usage has recently been noted in Germany. As of the end of 2012, the total installed power in ORC and Kalina systems there reached 12,1 MW<sub>e</sub> (Ganz et al. 2013), whereas electricity production reached 25,4 GWh in 2012. In 2013, commencement of operations was planned for the following installations: Dürrenhaar, Kirchstockach and Sauerlach. The construction works on the following stations are underway in Kirchweidach, Taufkirchen, Traunreut, Brühl and Groß Schönebeck (Ganz et al. 2013). Ultimately, development of the geothermal energy sector in Germany will allow approximately 60 to 70 MW<sub>e</sub> of power to be attained by 2015. The fact is especially interesting due to the similar geological and reservoir conditions in Poland.*





## 4. CHARAKTERYSTYKA GŁÓWNYCH STRUKTUR HYDROGEOTERMALNYCH PERSPEKTYWICZNYCH DLA TECHNOLOGII BINARNYCH

*(Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki, Marek Hajto,  
Bartosz Papiernik, Beata Kępińska, Wojciech Ciężkowski)*

### 4.1. Wprowadzenie

Wstępne oceny warunków hydrogeotermalnych głębokich zbiorników wód podziemnych w Polsce, dają podstawy do podjęcia badań nad możliwościami wykorzystania wód termalnych do produkcji energii elektrycznej z zastosowaniem systemów binarnych. Warunkiem ich realizacji jest pozyskanie (na wypływie z odwiertu) wód termalnych o temperaturze i wydajności (parametry podstawowe) na odpowiednim dla technologii poziomie. Na podstawie istniejących danych można spodziewać się spełnienia wymagań technologicznych i uzyskania odpowiednich parametrów w rejonie Niżu Polskiego, Sudetów oraz niecki podhalańskiej.

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że dla uzyskania ekonomicznej efektywności pracy tych układów wykorzystywana powinna być zarówno produkowana przez nie energia elektryczna, jak i energia cieplna.

Bazując na informacjach zawartych w istniejących materiałach: atlasach geotermalnych, publikacjach z zakresu hydrogeologii, geotermiki, geofizyki itd., w niniejszym rozdziale przedstawiono charakterystykę głównych struktur hydrogeotermalnych perspektywicznych dla analizowanych technologii binarnych. Cytowane opracowania, mające bardzo ogólny charakter, posłużyły do wstępnego – podstawowego wskazania i opisanie obszarów z temperaturami rzędu 100°C, znajdujących się w obrębie głównych zbiorników wód termalnych.

### 4.2. Niż Polski

*(Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki, Marek Hajto, Bartosz Papiernik)*

Podstawowe zasoby wód termalnych na Niżu Polskim związane są z warstwami wodonośnymi ery mezozoicznej. Wody termalne zakumulowane są przede wszystkim w formacjach piaszczystych dolnej kredy i dolnej jury (Sokołowski 1987; Ney, Sokołowski 1987; Górecki (red.) 1990; Górecki (red.) 1995). Znaczne zasoby energii geotermalnej zakumulowane są w wodach zbiorników: górnopolskiego, środkowopolskiego oraz lokalnie prawdopodobnie również górnopolskiego i dolnotriasowego (Górecki (red.) 2000; Górecki (red.) 2006).

Do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i cieplnej, przy skojarzonym zastosowaniu układów binarnych, wskazane jest wykorzystanie wód termalnych o temperaturze w złożu rzędu 90°C. Im niższa wydajność danego ujęcia tym spadek temperatury wody na wypływie z ujęcia będzie wyższy.

Na przeważającym obszarze Niżu Polskiego, dolnokredowe wody termalne – ze względu na stosunkowo płytkie ich występowanie – charakteryzują się w stropie warstwy wodonośnej temperaturami poniżej 90°C, co decyduje o odrzuceniu wód zbiornika dolnej kredy jako perspektywicznego dla wykorzystania w systemach binarnych.

Obliczone wartości zasobów statycznych (definiowanych jako ilość wolnej wody termalnej, występującej w porach, szczelinach lub kawernach w skałach danego poziomu hydrogeotermalnego) oraz statycznych – wydobywalnych energii geotermalnej (czyli statycznych pomniejszonych o współczynnik wydobywania) (Szczepański i in. 2006) pokazują, że największe zasoby geotermalne zakumulowane są w zbiornikach dolnopolskim i dolnotriasowym, przy czym zbiornik dolnotriasowy charakteryzuje się występowaniem największych zasobów geotermalnych w klasie temperaturowej powyżej 100°C oraz największą powierzchnią występowania zasobów geotermalnych. Z kolei dolnopolski zbiornik wód termalnych charakteryzuje się występowaniem największych zasobów dyspozycyjnych energii geotermalnej (definiowanych jako ilość wolnej wody termalnej poziomu hydrogeotermalnego lub innej jednostki bilansowej możliwa do zagospodarowania w danych warunkach środowiskowych, ale bez wskazania szczegółowej lokalizacji i warunków techniczno-ekonomicznych ujęcia wody) spośród wszystkich zbiorników geotermalnych na Niżu Polskim.

Ze względu na największe wartości zasobów geotermalnych, a tym samym największe perspektywy związane z wykorzystaniem wód termalnych zakumulowanych w zbiornikach dolnopolskim i dolnotriasowym zdecydowano o poszukiwaniu perspektywicznych lokalizacji dla systemów binarnych w obrębie tych zbiorników.

W analizach jako kryterium wyboru najkorzystniejszych lokalizacji dla instalacji binarnych na Niżu Polskim przyjęto temperaturę wód w stropie zbiornika geotermalnego co najmniej 90°C oraz minimalną wydajność otworu wiertniczego rzędu 20 m<sup>3</sup>/h (dla zbiornika triasu dolnego) oraz 50 m<sup>3</sup>/h (dla zbiornika jury dolnej).

Ze względu na brak informacji na temat wydajności otworów wiertniczych potencjalną ich wartość oszacowano zgodnie z metodyką opracowaną w Katedrze Surowców Energetycznych Akademii Górniczo-Hutniczej. Metodyka ta bazuje na klasycznych wzorach i nazewnictwie używanym w hydrogeologii ogólnej i była stosowana przy opracowywaniu Atlasów Geotermalnych w różnych rejonach Polski (Szczepański i in. 2006, 2011; Haładus i in. 2012).

Obliczenie potencjalnych wydajności otworów wiertniczych zafiltrowanych w obrębie zbiorników geotermalnych wymaga określenia wartości współczynnika filtracji oraz przyjęcia określonych warunków techniczno-eksploatacyjnych otworu. Do obliczenia wydajności przyjęto następujące założenia:

- ♦ średnica roboczej części filtra otworu 2r = 12" (0,305 m),
- ♦ depresja eksploatacyjna otworu nie przekroczy S = 100 m,
- ♦ depresja regionalna nie przekroczy 33 m,
- ♦ maksymalna miąższość ujętej warstwy wodonośnej wynosi m<sub>f</sub> = 100 m, co odpowiada długości części roboczej filtra.

Wartość współczynnika filtracji określono na podstawie zależności (Szczepański i in. 2006, 2011):

$$k = \frac{k_p \cdot (1 - 0,002 \cdot M_s) \cdot \rho_w \cdot 9,81}{239,4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{\frac{248,37}{T_s + 133,15}}} \quad (4.2.1)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik filtracji [m/s],  
 $k_p$  – współczynnik przepuszczalności [m<sup>2</sup>],  
 $M_s$  – mineralizacja wód w stropie danego zbiornika geotermalnego [kg/m<sup>3</sup>],  
 $\rho_w$  – gęstość wody złożowej [kg/m<sup>3</sup>],  
 $T_s$  – temperatura w stropie danego zbiornika geotermalnego [°C].

Oprócz map mineralizacji i temperatury wód w stropie zbiornika dolnojurajskiego do opracowania rozkładu współczynnika filtracji wykorzystano także mapę gęstości wód złożowych wykonaną według wzoru:

$$g_w = \left\{ 998,2 + \left[ \frac{700 \cdot M_s}{M_s + 998,2} \right] \right\} - 0,375 \cdot (T_s - 20) \quad (4.2.2)$$

gdzie:  $g_w$  – gęstość wód danego zbiornika geotermalnego [kg/m<sup>3</sup>],  
 $M_s$  – mineralizacja wód w stropie danego zbiornika geotermalnego [kg/m<sup>3</sup>],  
 $T_s$  – temperatura w stropie danego zbiornika geotermalnego [°C],  
 998,2 [kg/m<sup>3</sup>] – gęstość wody, przy  $M_s = 0$  [kg/m<sup>3</sup>] i  $T_s = 20^\circ\text{C}$ .

Do obliczeń wydajności wykorzystano równanie Dupuit'a stosowane dla poziomu lub warstwy wodonośnej o nieograniczonym zasięgu, eksploatowanej w warunkach ustalonych (Kulma 1995):

$$Q = 2\pi \cdot k \cdot m_f \cdot \frac{S}{\ln \frac{R}{r}} \quad (4.2.3)$$

gdzie:  $Q$  – wydajność otworu eksploatacyjnego [m<sup>3</sup>/s],  
 $k$  – współczynnik filtracji [m/s],  
 $m_f$  – miąższość utworów wodonośnych odpowiadająca długości części roboczej filtra [m],  
 $S$  – depresja w studni [m],  
 $r$  – promień roboczej części filtra otworu [m],  
 $R$  – promień leja depresji [m].

Promień leja depresji obliczono wzorem Sichardta:

$$R = 3000 \cdot S \cdot \sqrt{k} \quad (4.2.4)$$

gdzie:  $S$  – depresja w studni [m],  
 $k$  – współczynnik filtracji [m/s].

Do prac analitycznych wykorzystano i przetworzono bogaty materiał faktograficzny zgromadzony w Bazie Danych Katedry Surowców Energetycznych AGH, a także wykonywane wcześniej opracowania z analizowanego obszaru (m.in. Górecki (red.) 2006; Górecki (red.) 1996; Górecki (red.) 2000;

Górecki (red.) 1999; Sowizdzał 2009a, 2012). Jako materiał wyjściowy wykorzystywano mapy wykonane przez zespół AGH podczas realizacji *Atlasów geotermalnych Niżu Polskiego* (Górecki (red.) 2006) oraz mapy powstałe przy realizacji pracy doktorskiej (Sowizdzał 2009a) uzupełnione danymi otworowymi.

Prace zmierzające do wytypowania potencjalnych miejsc lokalizacji instalacji binarnych na Niżu Polskim przeprowadzono za pomocą zintegrowanego systemu przetwarzania danych geologicznych OpenWorks firmy Landmark Graphics Corporation, użytkowanego na podstawie grantu akademickiego (2003-COM-020272 i 2003-COM-020273), udzielonego Katedrze Surowców Energetycznych, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zasadnicze interpretacje parametrów systemu geotermalnego oraz obliczenia ilościowe przeprowadzono przy użyciu programu ZMap+, który pozwala na interpretację danych w trójwymiarowej siatce przestrzennej. Dobór i sposób użycia algorytmu interpolacyjnego był zróżnicowany i zależał od typu i właściwości analizowanych danych. Do prezentacji map wynikowych zastosowano odwzorowanie kartograficzne: Albers Equal Area oparte na elipsoidzie Krassovsky'ego (określonej w roku 1940), przy południku centralnym 19°.

#### 4.2.1. Zbiornik dolnojurajski

(Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki, Marek Hajto, Bartosz Papiernik)

Analiza parametrów hydrogeotermalnych zbiornika dolnej jury pokazała, że największe perspektywy dla wykorzystania wód termalnych tego zbiornika w systemach binarnych występują w centralnej części Niżu Polskiego, gdzie w rejonie Konina temperatura wód w stropie zbiornika przekracza 90°C. Jest to jednocześnie obszar, gdzie należy się spodziewać wysokich wydajności otworów wiertniczych, przekraczających założoną minimalną granicę 50 m<sup>3</sup>/h. Obszarem o znacznym potencjale geotermalnym w rejonie Niżu Polskiego jest także rejon niecki szczecińskiej (Górecki (red.) 1996; Górecki (red.) 1995, 2006; Sowizdzał 2009a, 2009b, 2009c, 2009d; 2010a, 2010b, 2010c, 2010d; 2012). Występujące tam zasoby energii hydrogeotermalnej związane są przede wszystkim ze zbiornikiem dolnojurajskim (zał. 4.2.1.).

##### 4.2.1.1. Niecka mogileńsko-łódzka

(Anna Sowizdzał, Wojciech Górecki, Marek Hajto, Bartosz Papiernik)

Obszar wytypowany jako najbardziej perspektywiczny administracyjnie znajduje się głównie na terenie województwa wielkopolskiego. Niewielki, mniej perspektywiczny fragment leży na terenie województw kujawsko-pomorskiego i łódzkiego. Najbardziej perspektywiczny teren, gdzie temperatura w stropie dolnej jury przekracza 120°C, znajduje się na terenie powiatu konińskiego i kolskiego i obejmuje gminy Sompolno i Wierzbinek (powiat koniński) oraz Babiak i Osiek Mały (powiat kolski) (zał. 4.2.2).

Topografia terenu na całym analizowanym obszarze jest mało zróżnicowana. Rzędna terenu zmienia się w niewielkim zakresie od ponad 80 m n.p.m. (np. otwór Trześńew 1) do około 120 m n.p.m. (otwór Uniejów 1).

Wytypowany obszar perspektywiczny znajduje się w centralnej części Niżu Polskiego i obejmuje fragment niecki mogileńsko-łódzkiej. Współczesne synklinorium mogileńsko-łódzkie w dolnej jurze było paleowyniesieniem. Utwory dolnojurajskie osadzały się w basenie o silnie zróżnicowanym dnie,



w którym rozwój cechsztyńskich struktur halokinetycznych powodował znaczne zmiany szybkości subsydencji. Ewolucyjne pogłębianie i spłykanie dna zbiornika wpływało na rozkład miąższości i facji utworów dolnojurajskich pokrywających utwory retu (Górecki (red.) 1996).

Sedymencja utworów jury dolnej odbywała się na przemian w środowisku lądowym i płytkomorskim. W fazach transgresyjnych najczęściej osadziły się heterolity i piaskowce płytszego szelfu, a w fazach regresyjnych utwory deltowe, fluwialne i bagienne o zróżnicowanej litologii. Jedynie w pliensbachu w fazie transgresywnej występują ilasto-mułowcowe utwory głębszego szelfu klastycznego. Pod względem litologicznym w profilu jury dolnej dominują miąższe kompleksy utworów piaskowcowych, od drobno- do gruboziarnistych, oraz kompleksy naprzemianległych mułowców, piaskowców i heteroliów. Miąższe kompleksy piaskowcowe związane są z osadami hetangu, synemuru, górnego pliensbachu oraz górnego toarku.

Miąższe kompleksy iłowcowe, które można korelować na dużych obszarach Niżu Polskiego, występują w dwóch podstawowych przedziałach stratygraficznych. Starszy kompleks datowany jest na wczesny pliensbach, młodszy na toark dolny. Młodszy kompleks ilasty występuje na całym obszarze obecnego zasięgu osadów jury dolnej. Na większości obszaru jest to zwarty kompleks szarozielonych iłowców i mułowców o stałej miąższości 70–90 m (Górecki (red.) 2006).

Osady dolnej jury leżą na różnych ogniwach triasu, głównie na niewodonośnych skałach retyku. Przykryte są głównie niewodonośnymi osadami doggeru, niekiedy kredy, trzeciorzędu, neogenu i czwartorzędu (Górecki (red.) 1995).

Warstwami wodonośnymi w osadach dolnej jury analizowanego obszaru są więc kompleksy piaskowców hetangu, synemuru, domeru i toarku górnego, poprzedzielane nieciągłymi seriami osadów słabo przepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci zwężonych, drobnoziarnistych piaskowców i mułowców oraz iłowców. Kompleksem izolującym o największej powierzchni jest iłowcowo-mułowcowy, niekiedy przewarstwiony piaskowcami, kompleks osadów toarsu dolnego. Utworów tych brak w centralnej części synklinorium mogileńsko-łódzkiego.

W obszarze objętym szczegółowymi analizami zlokalizowanych jest 10 otworów wiertniczych dokumentujących w różnym stopniu utwory dolnej jury i charakteryzujących się zróżnicowaną głębokością końcową od 2990 m p.p.t (Niestronno 1) do 4772 m p.p.t. (Uniejów 1). Do interpretacji parametrów hydrogeotermalnych wykorzystano dane ze znacznie większej liczby otworów zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie wytypowanego obszaru (zał. 4.2.1).

Pełny profil utworów jury dolnej reprezentuje zlokalizowany w północnej części analizowanego obszaru otwór Damasławek 22. Profil rozpoczynają piaskowcowe utwory hetangu (63 m) i synemuru (66 m). Powyżej zalega 19-metrowy kompleks iłowców pliensbachu dolnego. Pliensbach górny reprezentowany jest przez 27-metrową warstwę piaskowcową. Na niej zalegają mułowce toarku dolnego (117 m) oraz piaskowce toarku górnego (11 m). W otworze Niestronno 1 utwory dolnojurajskie reprezentowane są tylko przez piaskowcowe osady pliensbachu, brak jest natomiast utworów hetangu, synemuru i toarku.

W zlokalizowanym w południowej części obszaru badań otworze Poddębice PIG-2 warstwy dolnojurajskie budują osady piaskowcowe pliensbachu górnego i toarsu górnego oraz mułowcowo-iłowcowe utwory hetangu, synemuru i toarku dolnego. Przykładowe przekroje litostratygraficzne prezentują załączniki 4.2.3 i 4.2.4.

W obszarze perspektywnym strop jury dolnej zalega na głębokościach od około –2000 m n.p.m. do ponad –3400 m n.p.m. w osiowej części niecki mogileńsko-łódzkiej (zał. 4.2.5).

Najwyższe wartości temperatur (do ponad 130°C w stropie zbiornika) występują w strefie najgłębszego zalegania stropu dolnej jury (3400–3600 m p.p.t.) na terenie powiatu konińskiego (gminy Sompolno i Wierzbinek) i kolskiego (gminy Babiak i Osiek Mały). Wysokich temperatur w obrębie utworów dolnojurajskich można spodziewać się we wschodniej części obszaru badań (zał. 4.2.7), gdzie wzrasta znacznie miąższość osadów dolnej jury, a tym samym spąg dolnej jury zalega najgłębiej (>4000 m). Miąższość całkowita utworów dolnojurajskich zwiększa się w kierunku północno-wschodnim od kilkudziesięciu metrów (Trześniew-1, Uniejów-1) do ponad 600 metrów (w otworze Brześć Kujawski IG-1 zlokalizowanym na wale kujawskim całkowita miąższość utworów liasowych przekracza 900 metrów) (zał. 4.2.6).

Ze względu na znaczną głębokość zalegania zbiornika dolnojurajskiego, a także obecność struktur solnych (poduszka solna Trzemiń, Uniejowa, słup solny Kłodawy, Ponętowa i Damasławka), wody analizowanego zbiornika cechują się stosunkowo wysokimi wartościami mineralizacji kształtującej się w granicach od około 70 g/dm<sup>3</sup> (w brzeźnych strefach obszaru m.in. w rejonie Konina) do ponad 170 g/dm<sup>3</sup> (w otoczeniu struktur solnych) (zał. 4.2.8). Wysoką mineralizację 172–189 g/dm<sup>3</sup> stwierdzono m.in. na skłonie struktury Damasławka, gdzie w wyniku tektoniki solnej następuje przegłębienie utworów jury dolnej do 3374 m p.p.t. Występujące na wytypowanym obszarze wody to na ogół wody typu chemicznego Cl-Na, miejscami jodkowe.

Dla rejonu niecki mogileńsko-łódzkiej współczynnik przepuszczalności mieści się w granicach od kilkudziesięciu mD do 1627,2 mD. Średnia geometryczna wartość tego współczynnika wynosi 285,35 mD dla obszaru niecki mogileńsko-łódzkiej oraz 1100 mD dla całego Niżu Polskiego (Górecki (red.) 2006).

Porowatość efektywna wodonośnych utworów dolnojurajskich niecki mogileńsko-łódzkiej zawiera się w granicach od 7,95 do 25,35%. Średnia arytmetyczna wartość tego parametru wynosi 18,3% (dla całego Niżu Polskiego 18,85%).

Próbne pompowanie dla określenia wartości współczynnika filtracji wykonano w 24 otworach. W otworze Damasławek 22 współczynnik filtracji utworów jury dolnej wyniósł  $4,8 \cdot 10^{-7}$  m/s. Współczynnik filtracji dla rejonu niecki mogileńsko-łódzkiej zawiera się w granicach od  $9,48 \cdot 10^{-8}$  do  $1,2 \cdot 10^{-5}$  m/s. Średnia geometryczna wartość tego parametru wynosi  $2,11 \cdot 10^{-6}$  m/s.

W otworze Damasławek 22 współczynnik przepuszczalności wynosi 28,48 mD, a porowatość efektywna warstw wodonośnych 10,35%. W otworze Uniejów 1 średnia porowatość wodonośnych warstw dolnej jury wynosi 10,95%. W otworze Banachów IG-1 pomierzone wartości porowatości utworów piaskowcowych wynoszą od kilku do 10,32%.

W otworach zlokalizowanych w bezpośrednim otoczeniu wytypowanego obszaru (Janowiec 3, Trzemiń 2) współczynnik przepuszczalności wynosi odpowiednio 206,6 i 27,3 mD. Średnia porowatość efektywna piaskowców dolnojurajskich w otworze Trzemiń 2 wynosi 12,57%.

Obliczona wydajność potencjalna otworów wiertniczych na analizowanym obszarze kształtuje się w granicach od kilkudziesięciu do około 280 m<sup>3</sup>/h (zał. 4.2.9). W kilku strefach wydajność spada nieznacznie poniżej 50 m<sup>3</sup>/h, jednak ze względu na określenie jedynie potencjalnej wydajności otworów wiertniczych strefy te nie zostały wykluczone z obszaru analiz.

Na rysunku 4.2.1. przedstawiono mapę pola hydrodynamicznego zbiornika wód podziemnych jury dolnej (Górecki (red.) 1995). Prezentuje ona rozkład zredukowanych wysokości naporu hydraulicznego (w atmosferach) oraz główne kierunki przepływu wód podziemnych.



Rys. 4.2.1. Mapa pola hydrodynamicznego dolnojurajskiego zbiornika wód podziemnych (na podstawie Górecki (red.) 1995)

1 – zasięg występowania utworów jury dolnej; 2 – izolinie zredukowanego ciśnienia wód podziemnych [atm. n.p.o.], 3 – główne kierunki przepływu wód podziemnych

Fig. 4.2.1. Map of Lower Jurassic aquifer hydrodynamic field (based on Górecki (ed.), 1995)  
1 – the range of the Lower Jurassic; 2 – isolines of groundwaters reduced pressure [atm a.r.l];  
3 – main directions of groundwater flow

#### 4.2.1.2 Niecka szczecińska (Anna Sowizdzał)

Niecka szczecińska, stanowiąca północną część niecki szczecińsko-łódzko-miechowskiej, stanowi element silnie wydłużony o sfalowanym obszarze. Jej skrzydła są asymetryczne; skrzydło północno-wschodnie jest bardziej strome, południowo-zachodnie łagodniejsze (Stupnicka 1997).

Głównym czynnikiem tektonicznym, który powodował kształtowanie się aktualnej budowy strukturalnej kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego niecki szczecińskiej były zróżnicowane ruchy pionowe bloków podłoża podcechsztyńskiego, występujące głównie wzdłuż wgłębnych płaszczyzn nieciągłości tektonicznych. Ruchy te, na ogół powolne i długotrwałe, powodowały zróżnicowanie tempa i rodzaju sedimentacji, wyrażające się zmianami miąższości i facji oraz powstawaniem powierzchni erozyjnych, a także mechanicznych deformacji nadległego kompleksu osadowego, czyli przebudową strukturalną. Główny etap powstawania tych deformacji przypada w najstarszym paleogenie (Pożaryski 1974).

Drugim czynnikiem kształtującym budowę tektoniczną obszaru są przemieszczenia poziome i pionowe soli cechsztyńskich, które zachodziły z niewielkimi przerwami praktycznie przez cały czas sedimentacji kompleksu, począwszy od górnego triasu. Przemieszczenia te były inicjowane przez ruchy bloków podłoża serii solnej, a następnie interferowały z tymi ruchami, mogąc być częściowo procesem autonomicznym, sterowanym przez różnice gęstościowe (Jaskowiak-Schoeneichowa 1979). Zróżnicowanie form tektoniki lokalnej można zaobserwować w spągu kredy, gdzie widocznie zaznaczają się osie synklin i antyklin o przeważającym przebiegu NW-SE. Strefa silnego oddziaływania tektoniki solnej, ciągnąca się wzdłuż niecki szczecińskiej, obejmuje kilkanaście struktur solnych uszeregowanych w ciągu po linii od strefy ryglowej Szamotuły–Oborniki po Kamień Pomorski–Międzyzdroje (Garlicki, Szybist 1986). Struktury te zakwalifikowane są w większości do częściowo przebijających przez mezozoik, czyli przerywające ciągłość części profilu skał osłony (Dadlez, Jaroszewski 1994).

Badany obszar przykryty jest utworami kenozoicznymi, na które składają się przeważnie lądowe osady klastyczne paleogenu i neogenu oraz czwartorzędu, przy czym utwory paleogenu i neogenu nie występują na całym obszarze. Powstanie eoceńskich osadów węglonośnych poprzedziła akumulacja piasków kwarcowych w części północnej oraz piasków i żwirów w części środkowej niecki szczecińskiej. Łądolód zlodowacenia południowopolskiego zaburzył osady paleogenu, a w niektórych strefach wycisnął z pierwotnego położenia. Wśród utworów czwartorzędowych występują kry utworów mezozoicznych (Jaskowiak-Schoeneichowa 1979).

Kreda górna niecki szczecińskiej nie posiada wychodni na powierzchni. Jest ona przykryta całkowicie utworami młodszymi. Miąższość całkowita utworów kredy górnej jest zmienna w granicach od kilkuset metrów w brzeżnych częściach niecki do prawie 2000 m w części centralnej. Spadek miąższości jest obserwowany ponad strukturami solnymi. Na przeważającej powierzchni rozprzestrzeniania się utworów górnokredowych, głębokość zalegania stropu nie spada poniżej 160 m p.p.m. Tendencja opadania stropu występuje jedynie w północnej części niecki szczecińskiej, gdzie w rejonie Szczecina i Trzebieży strop opisywanego poziomu zalega na głębokości poniżej 300 m p.p.m. (Sowizdzał 2009a).

W kredzie dolnej basen szczeciński był paleowyniesieniem, na którym nastąpiła redukcja osadów i erozyjne ścięcie dużej jego części. Utwory te zachowały się jedynie w postaci cienkiej powłoki osadów albu, mające zaś większą miąższość ogniwa kredy dolnej występują jedynie w wąskich paleodepresjach o cechach bruzd lub rowów (Górecki (red.) 1995). Strop utworów kredy dolnej zalega na głębokościach zmiennych w granicach od 0 do ponad –2200 m n.p.m. Największe głębokości występowania stropu tych utworów są rejestrowane w centralnych częściach niecki szczecińskiej, gdzie rzędna wynosi poniżej –2000 m n.p.m., podczas gdy ku strefom brzeżnym strop utworów kredy dolnej podnosi się do rzędnych powyżej –500 m n.p.m. i dochodzi nawet do 0 m n.p.m. w rejonie Szamotuł (Sowizdzał 2009a).



Najpełniej wykształcone osady górnej jury zachowały się w północno-wschodniej części niecki szczecińskiej, sięgając na południe w obręb struktury Szamotuł, gdzie zaznaczają się największe miąższości tych utworów. Całkowita miąższość warstw górnourajskich zmienia się w granicach od 40 do ponad 600 m w południowo-wschodniej strefie peryferyjnej niecki. Największe głębokości zalegania stropu utworów górnourajskich, sięgające –2200 m n.p.m., obserwowane są w centralnej części niecki w okolicach Chociwla, podczas gdy najpłycej utwory te zostały nawiercone w północnej i południowej brzeżnej strefie niecki, gdzie lokalnie zalegają na głębokości 15 m n.p.m. (Sowiżdżał 2009a).

Zróznicowanie w zakresie miąższości i litologii utworów jury środkowej wskazuje na ruchliwość basenu środkowourajskiego. W okresie środkowej jury miało miejsce kilka transgresji, przy czym najsilniejsza nastąpiła z początkiem górnego kujawu, kiedy to również na wyniesionych dotąd strefach trwała sedymentacja morska. Zróznicowanie sedymentacyjne, wyrażone m.in. znacznymi redukcjami miąższości, zaznacza się w zachodniej części obszaru po górnym kujawie. W części wschodniej obszaru sedymentacja przebiegała spokojnie, co znajduje odzwierciedlenie w pełnym profilu stratygraficznym (Dayczak-Calikowska 1979). W wyniku procesów środkowourajskich wykształcenie osadów bywa dość zmienne. Ich miąższość zmienia się w szerokich granicach od około 20 m w rejonie południowo-zachodnim do ponad 300 m w północnej części niecki szczecińskiej (Sowiżdżał 2009a). Również głębokość zalegania stropu utworów środkowourajskich cechuje się dużą zmiennością. Analizując jego położenie stwierdza się najgłębsze jego zaleganie w osiowej części niecki oraz podnoszenie ku strefom peryferyjnym. W otworze Wicko 1, zlokalizowanym na północnym skraju obszaru, zalega na głębokości prawie –30 m n.p.m., podczas gdy najgłębiej zalegający strop warstw środkowourajskich, sięgający –2500 m n.p.m., odnotowuje się w otworze Chociwel IG-1 (Sowiżdżał 2009a).

Osady jury dolnej, rozprzestrzenione na całym obszarze badań, charakteryzują się naprzemianległym ułożeniem warstw środowiska jeziornego i rzecznoego (Deczkowski i in. 1997). Na przełomie liasu i jury środkowej stwierdzono ruchliwość struktur solnych, o czym świadczy lokalny brak warstw kamieńskich i częściowe usunięcie warstw gryfickich. W czasie liasu różnice w facjach pomiędzy częścią północną i południową obszaru są niewielkie, natomiast zaznacza się wyraźna różnica w prędkości subsydencji przy zasadniczo pełnym rozwoju serii w obu częściach (Dadlez, Franczyk 1979). Ze względu na aktywność tektoniki solnej, miąższość liasu w północno-zachodniej i południowo-zachodniej części obszaru jest bardzo zmienna i waha się w granicach od 500 do około 1400 m, osiągając maksymalne wartości w północnej części obszaru, podczas gdy w rejonie Gorzowa miąższość utrzymuje się na stałym poziomie 300–400 m (Sowiżdżał 2009a). Strop utworów dolnej jury wznosi się ku peryferyjnym częściom niecki do głębokości około –300 m n.p.m., a opada w części centralnej, osiągając maksymalnie głębokość –2500 m n.p.m. w rejonie Chociwla (Sowiżdżał 2009a).

Na całym obszarze badań profil dolnourajski budują utwory piaszczysto-ilaste. Osady ilaste występują w hetangu dolnym (warstwy mechowskie dolne) oraz górnym. Są to lądowe osady rozległych jeziorzysk oraz rzek meandrujących i ich równi zalewowych. Osady środkowej jury dolnej są wykształcone głównie w postaci piaskowców, a osady górnej jury dolnej w postaci iłowców, dominujących w utworach toarku dolnego oraz piaskowców toarku górnego. Najbardziej rozprzestrzenione jest występowanie utworów piaszczystych, najczęściej w postaci białych, szarych i żółtych piaskowców drobno- i średnioziarnistych (Deczkowski i in. 1997).

W retyku na rozpatrywanym obszarze istniały zbiorniki słodkowodne. Przed rozpoczęciem sedymentacji liasu w południowo-zachodniej części obszaru nastąpiło dźwignięcie i nieznaczna denu-

dacja utworów retyku (Dadlez, Franczyk 1979). Miąższość utworów triasu górnego wykazuje bardzo duże wahania, na co między innymi miał wpływ ruch soli cechsztyńskiej. Całkowita miąższość utworów górnourajskich jest zmienna w granicach od kilkunastu do kilkuset metrów, osiągając lokalnie w okolicach Szamotuł wartość ponad 1000 m (Sowiżdżał 2009a). Wraz ze zróznicowaną miąższością obserwuje się także dużą zmienność zalegania stropu utworów triasu górnego w granicach od około –800 m n.p.m. w brzeżnych strefach niecki szczecińskiej do ponad –2800 m n.p.m. w strefie osiowej (Sowiżdżał 2009a).

Osady wapienia muszlowego powstały w płytkim, rozległym morzu epikontynentalnym i tworzyły się głównie w strefie sublitoralnej (Gajewska 1997). Miąższość utworów triasu środkowego cechuje się łagodnymi i niewielkimi zmianami, przyjmując wartości od 130 m w północno-zachodniej części obszaru do 290 m w części centralnej. Strop utworów triasu środkowego zalega na rzędnych od około –1000 m n.p.m. w części północnej (np. w otworze Świnoujście 1) do ponad –3000 m n.p.m. w części centralnej (Stargard 1). Na większych głębokościach strop utworów środkowourajskich zalega w osiowej partii niecki, wznosząc się ku strefom peryferyjnym (Sowiżdżał 2009a).

Utwory triasu dolnego występują na całym obszarze badań, z wyjątkiem stref oddziaływania tektoniki solnej. Ich strop zalega na rzędnych od około –1200 m n.p.m. w północnej części obszaru (Dargobądz 1) do ponad –3500 m n.p.m. w części centralnej, osiągając maksymalne wartości w otworze Chociwel 2. Tendencja wznoszenia się stropu ku brzeżnym strefom utrzymuje się na całym obszarze rozprzestrzeniania się utworów dolnourajskich. Miąższość całkowita omawianych osadów jest zmienna w granicach od 400 m do ponad 1000 m. Najmniejsze miąższości całkowite tych utworów zostały stwierdzone w strefie północnej niecki szczecińskiej, podczas gdy miąższości przekraczające 1000 metrów występują w rejonie jej wschodniego obrzeżenia (Sowiżdżał 2009a).

Pod utworami mezozoicznymi znajdują się utwory salinarne cechsztynu, które w czasie sedymentacji utworów mezozoicznych wpływały na ich rozwój, a pod nimi piaskowcowe i eruptywne utwory czerwonego spągowca, leżące na sfałdowanych i częściowo zerodowanych utworach karbonu-dewonu orogenu waryscyjskiego i na utworach piaszczystych górnego karbonu, wypełniających obszar zapadliska przedwaryscyjskiego. Pod strefą gorzowską znajduje się ponad 1500 m skał eruptywnych, co powoduje intensywny stopień migracji ciepła z głębi ku powierzchni (Sokołowski i in. 1998).

#### **Charakterystyka termiczna obszaru badań**

Gęstość powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi, na obszarze niecki szczecińskiej przyjmuje jedne z najwyższych wartości tego parametru w skali Polski. Kształtują się one w zakresie od prawie 70 do ponad 100 mW/m<sup>2</sup>. Wartości minimalne, rzędu 70–75 mW/m<sup>2</sup>, rejestrowane są w strefie wschodniego obrzeżenia niecki szczecińskiej, podczas gdy wartości maksymalne, przekraczające 90 mW/m<sup>2</sup>, związane są ze strefą południową niecki szczecińskiej (Szewczyk, Hajto 2006). Wysokie wartości strumienia ciepłego znajdują odzwierciedlenie w rozkładzie temperatur wgłębnych.

Analiza rozkładu gradientu geotermalnego w utworach formacji mezozoicznej wykazała, że średni gradient geotermalny na tym obszarze przyjmuje wartość 3,12°C/100 m (Sowiżdżał 2009a, 2012). Największy przyrost temperatury wraz z głębokością zaobserwowano w części północno-zachodniej obszaru, gdzie w rejonie Goleniowa i Trzebieży gradient geotermalny oscyluje wokół 5°C/100 m. Najniższą wartość uśrednionego gradientu geotermalnego, nie przekraczającą 2,5°C/100 m, cechują

się utwory mezozoiczne brzeżnych części niecki szczecińskiej (Wolin IG-1, Rokita IG-1, Międzychód IG-1) (Sowiżdżał 2009a).

Rozkład temperatur w stropach utworów mezozoicznych jest ściśle powiązany z budową geologiczną obszaru. W strefie centralnej obszaru, odpowiadającej głębszemu pograżeniu utworów mezozoicznych, odnotowywane są wyższe temperatury wgłębne niż w strefach brzeżnych, gdzie stropy poszczególnych formacji zalegają płycej.

Analiza temperatur wgłębnych w stropach zbiorników mezozoicznych pokazała, że temperatury przekraczające graniczne 90°C związane są ze stropami zbiorników triasowych.

Najbardziej perspektywiczny w rejonie niecki szczecińskiej dolnojurajski zbiornik hydrogeotermalny (Sowiżdżał 2009a,b,c,d; 2010a,b,c; 2012) w stropowej partii zawiera wody o temperaturach od około 20 do prawie 90°C. Najwyższą temperaturę w stropie utworów dolnej jury odnotowano w otworze Chociwel 3, zlokalizowanym w części osiowej niecki (89°C). Analiza mapy temperatury w stropie utworów dolnej jury jednoznacznie wskazuje na występowanie dwóch obszarów o podwyższonych parametrach termicznych (zał. 4.2.10). Są to rejon Chociwla oraz Stargardu Szczecińskiego. Analiza profilowania termicznego wykonanego w otworze Stargard 1 (rys. 4.2.1.1) wskazuje, że w spągowej części zbiornika dolnojurajskiego temperatura będzie osiągała wartość 100°C. Tak więc lokalnie w obrębie zbiornika dolnojurajskiego można wskazać obszary występowania temperatur powyżej granicznych 90°C.

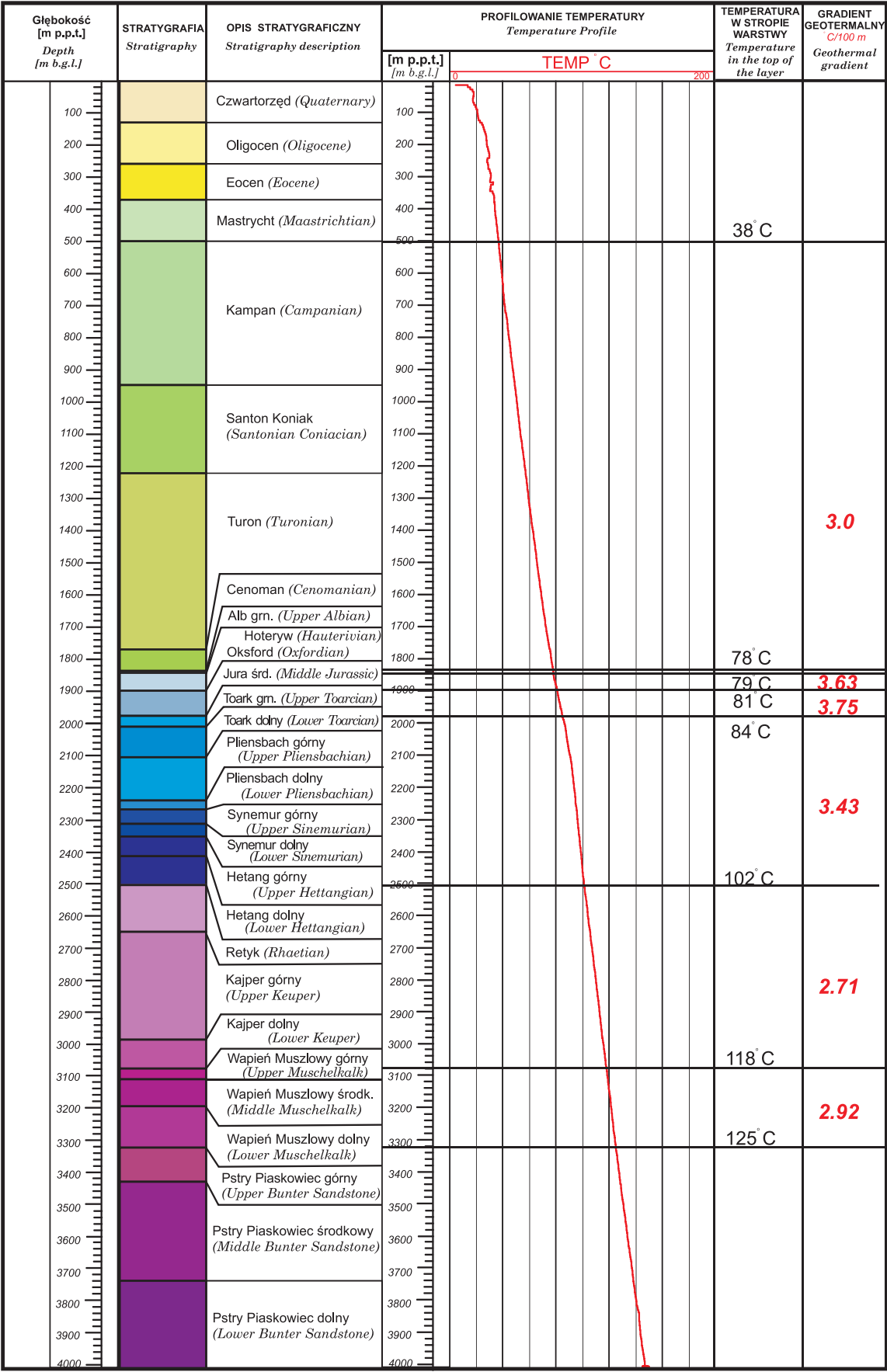
Analizując rozkład temperatur w stropie utworów triasu górnego należy zauważyć, że strefa występowania temperatur powyżej 90°C obejmuje obszar centralnej części niecki szczecińskiej (Chociwel, Stargard). Temperatura w stropie utworów triasu środkowego jest zmienna w granicach od około 35°C (Kamień Pomorski) do ponad 100°C (Stargard). Z kolei strefa występowania temperatur przekraczających graniczne 90°C w stropie utworów triasu dolnego jest największa i obejmuje część centralną oraz północno-wschodnie obrzeżenie niecki szczecińskiej (Sowiżdżał 2009a, 2012).

**Perspektywiczny zbiornik geotermalny w rejonie niecki szczecińskiej**

Rozpatrując możliwości akumulacji energii geotermalnej w utworach formacji mezozoicznej rejonu badań, przeanalizowano budowę geologiczną obszaru pod kątem występowania potencjalnych skał zbiornikowych. Prawie we wszystkich analizowanych otworach, największy udział osadów piaszczystych przypadają na utwory dolnojurajskie, obejmujące swoim zasięgiem cały obszar niecki szczecińskiej. W północnej części niecki szczecińskiej na uwagę zasługuje piaskowcowy poziom dolnotriasowy, jednak jest to strefa występowania niższych temperatur (<90°C).

W stronę południową następuje zwiększenie udziału skał ilastych w profilu triasu dolnego. W części centralnej obszaru badań, ze względu na znaczną głębokość pograżenia utworów dolnotriasowych, w wielu otworach strop triasu dolnego nie został nawiercony. W utworach triasu środkowego największe perspektywy akumulacji wód termalnych związane są z warstwami wapieniami, głównie wapienia muszlowego dolnego (Sokołowski i in. 1998). Niemniej jednak słaby stopień rozpoznania tego poziomu zbiornikowego, związany z ubogim materiałem rdzeniowym uzyskiwanym z wierceń oraz z niewielką ilością wykonywanych pomiarów geofizycznych, uniemożliwia poprawne szacowanie potencjału geotermalnego zbiornika środkowotriasowego.

Rozkład temperatur wgłębnych na obszarze niecki szczecińskiej pokazuje, że najwyższymi temperaturami, wynikającymi z głębokości zalegania, cechują się najstarsze utwory formacji mezozoicznej.



Rys. 4.2.1.1. Profil stratygraficzny oraz parametry termiczne w otworze Stargard 1 (na podstawie Sowiżdżał 2012)

Fig. 4.2.1.1. Stratigraphic profile and thermal parameters of the Stargard 1 well (on the basis Sowiżdżał 2012)



Pomimo korzystnych temperatur w głęboko pograżonych strefach basenu występują skały wodonośne reprezentowane przez głębsze facje basenu, poddane zmianom diagenetycznym, posiadające gorsze właściwości zbiornikowe, co ogranicza wydajności i możliwości zatłaczania wody w warstwę chłonną (Górecki (red.) 2006).

Na obszarze niecki szczecińskiej zlokalizowane są cztery głębokie (>4000 m p.p.t.) otwory wiertnicze udostępniające utwory dolnotriasowe: Stargard 1, Strzelce Krajeńskie IG-1, Trzebież 1 i Banie 1.

W otworze Strzelce Krajeńskie IG-1 zlokalizowanym w południowej części niecki szczecińskiej trias dolny reprezentowany jest głównie przez iłowce i mułowce, rzadziej wapienie i piaskowce. Skały węglanowe charakteryzują się niską porowatością (średnio 0,8%), natomiast występujące na głębokości 2472,5 m p.p.t. piaskowce cechują się średnią porowatością efektywną rzędu 10% oraz przepuszczalnością 0,5 mD.

Przeprowadzona w dalszej części analiza pokazała, że osady triasu dolnego na Niżu Polskim, w głęboko zalegających strefach basenu gwarantujących wysoką temperaturę w zbiorniku, charakteryzują się często bardzo niskimi wartościami parametrów zbiornikowych, uniemożliwiających efektywne wykorzystanie wód termalnych i tylko lokalnie można spodziewać się występowania skał piaszczystych o lepszych parametrach.

Niewątpliwie najlepsze parametry zbiornikowe w rejonie niecki szczecińskiej związane są z piaszczystymi utworami jury dolnej. W stropowych partiach zbiornika temperatura jest zbyt niska, aby można było wykorzystać wody do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych. Warstwy zbiornikowe o najlepszych parametrach to warstwy mechowskie i radowskie, zalegające w spągowej części zbiornika (Sowiżdżał 2009a, 2012), z nimi też należy wiązać perspektywę zagospodarowania energii geotermalnej.

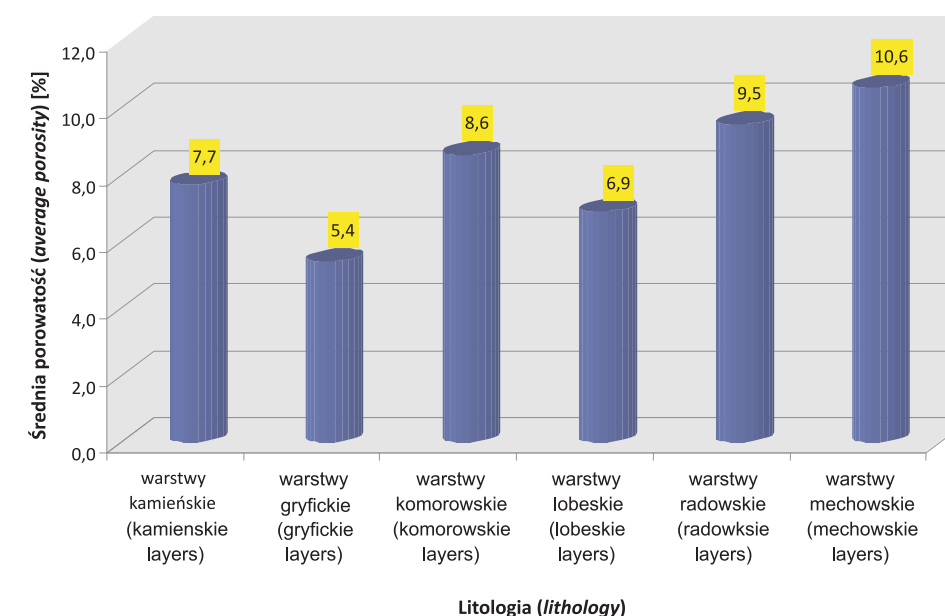
Potwierdzeniem występowania korzystnych warunków geotermalnych w obrębie zbiornika dolnojurajskiego jest pracujący zakład geotermalny w Stargardzie Szczecińskim. Charakterystyczną cechą systemu jest wysoka temperatura wody termalnej wynosząca na głowicy otworu 87°C. Temperatura wody złożowej w warstwie wodonośnej wynosi od 86,5 do 94°C. Woda złożowa to solanka typu chlorkowo-sodowego o mineralizacji 121,1 g/dm<sup>3</sup>. Wydajność eksploatacyjna ujęcia została udokumentowana na poziomie 300 m<sup>3</sup>/h (Kubski 2008).

#### Charakterystyka perspektywicznych poziomów zbiornikowych jury dolnej

W obrębie jury dolnej wyróżniono od stropu warstwy kamieńskie, gryfickie, komorowskie, łobeskie, radowskie i mechowskie (Deczkowski i in. 1997). Takie wyszczególnienie jednostek regionalnych jury dolnej, powiązane jest z paleogeografią poszczególnych okresów i odpowiada powszechnie stosowanemu w geologii podziałowi kraju na młodomezozoiczne jednostki tektoniczne.

Warstwami wodonośnymi w utworach jury dolnej niecki szczecińskiej są kompleksy piaskowców. Najlepszymi parametrami zbiornikowymi cechują się piaszczyste utwory warstw radowskich i mechowskich, a nieznacznie gorszymi także utwory warstw komorowskich i kamieńskich. Warstwy radowskie wykształcone są głównie jako osady piaszczyste. Wśród warstw mechowskich dominującą rolę odgrywają osady piaszczyste, zawierające przewarstwienia utworów słabo przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci mułowców i iłowców. Osady piaskowcowe jury dolnej rozdzielają serie osadów słabo przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci mułowców i iłowców. Kompleks izolujący stanowią utwory warstw łobeskich i gryfickich, cechujące się najwyższymi wartościami zailenia w całym profilu dolnojurajskim (Sowiżdżał 2009a, 2012).

Najwyższe wartości średniej porowatości całkowitej (ok. 10%) związane są z wodonośnymi utworami warstw radowskich i mechowskich. Fakt ten znajduje odzwierciedlenie w niskiej wartości zailenia tych warstw. Najniższą wartością uśrednionej porowatości (5,4%), odpowiadającą najwyższej wartości zailenia, cechują się warstwy gryfickie (Sowiżdżał 2009a, 2012) (rys. 4.2.1.2).



Rys. 4.2.1.2. Uśredniona wartość porowatości całkowitej poszczególnych warstw jury dolnej

Fig. 4.2.1.2. Average total porosity values for individual Lower Jurassic strata

Wodonośne utwory warstw radowskich o najlepszych parametrach występują głównie w zachodniej części niecki szczecińskiej, gdzie średnia wartość porowatości kształtuje się na poziomie powyżej 20%. Maksymalną wartość tego parametru stwierdzono w otworze Stargard 1 (39,3%) (zał. 4.2.11). Piaskowce warstw mechowskich charakteryzują się najwyższą średnią wartością porowatości spośród warstw dolnojurajskich (10,6%). Podobnie jak w przypadku warstw radowskich, utwory o najkorzystniejszych porowatościach zlokalizowane są w strefie na południe od Szczecina. W otworze Chabowo 1 zarejestrowano piaskowce o maksymalnej porowatości (31,8%). Lokalnie obserwuje się brak występowania warstw radowskich. Ma to miejsce w okolicach Chociwła, gdzie bezpośrednio nad warstwami mechowskimi zalegają utwory warstw komorowskich. Tak korzystne parametry zbiornikowe przekładają się na wysokie wartości potencjalnych wydajności. Potencjalna wydajność otworów wiertniczych w utworach jury dolnej w całym rejonie niecki szczecińskiej przekracza założone minimalne 50 m<sup>3</sup>/h, a w wytypowanych obszarach perspektywicznych (zał. 4.2.10, 4.2.16) wydajność przekracza 250 m<sup>3</sup>/h.

Maksymalne temperatury w stropie zbiornika dolnojurajskiego niecki szczecińskiej kształtują się na poziomie 85°C (okolice Chociwła) (zał. 4.2.14), co przy uwzględnieniu miąższości warstwy w tym miejscu rzędu 450 m (zał. 4.2.13.) i gradientie geotermalnym na poziomie 3°C/100 m, daje maksymalną temperaturę około 100°C w spągowej partii zbiornika.

Rozważając możliwości wykorzystania wód termalnych warstw mechowskich lub radowskich zbiornika dolnojurajskiego przeanalizowano wartości temperatur w spągowych częściach tego zbiornika. Zaznaczają się dwa obszary o temperaturach przekraczających 90°C. Pierwszy zlokalizowany jest w rejonie Chociwła, gdzie temperatury warstw dolnojurajskich są najwyższe (lokalnie prze-

kraczącą 95°C). Obszarem występowania nieznacznie niższych temperatur jest rejon Stargardu Szczecińskiego. W stropie zbiornika temperatura kształtuje się na poziomie ponad 75°C (zał. 4.2.14), podczas gdy w spągu rejestrowane są temperatury maksymalnie przekraczające założone graniczne 90°C. Profilowanie termiczne wykonane w otworze Stargard 1 pokazuje, iż w warstwach mechowskich (hetang, synemur dolny) temperatura sięga 100°C (rys. 4.2.1.1).

W obydwu obszarach zlokalizowanych jest w sumie 13 otworów wiertniczych udostępniających utwory dolnojurajskie, przy czym 3 otwory umiejscowione są w okolicach Stargardu Szczecińskiego, a 10 w rejonie Chociwła (zał. 4.2.10).

W rejonie Chociwła strop utworów jury dolnej zalega nieco głębiej (od –1900 do –2500 m n.p.m.) niż w rejonie Stargardu Szczecińskiego (od –1700 do –2000 m n.p.m.) (zał. 4.2.12) stąd też wyższe temperatury rejestrowane są w tym pierwszym obszarze. Jest to też obszar występowania mięjszych warstw jury dolnej, lokalnie przekraczających 650 m (zał. 4.2.13). W rejonie Stargardu obserwowane są miąższości warstw rzędu 450–500 m (zał. 4.2.13).

Na całym analizowanym obszarze mineralizacja wód przekracza 100 g/dm<sup>3</sup>, przy czym wyższe wartości obserwowane są w okolicach Chociwła, gdzie lokalnie mineralizacja przekracza 125 g/dm<sup>3</sup> (zał. 4.2.15). Wysokie wartości mineralizacji związane są między innymi z aktywnością tektoniki solnej, która przebiega wzdłuż całej niecki szczecińskiej. Kilkanaście struktur solnych uszeregowanych jest w ciągu po linii od strefy ryglowej Szamotuły–Oborniki po Kamień Pomorski–Międzyzdroje (Garlicki, Szybist 1986). Struktury te zakwalifikowane są w większości do częściowo przebijających przez mezozoik, czyli przerywające ciągłość części profilu skał osłony (Dadlez, Jaroszewski 1994). Również na wytypowanym obszarze zaznacza się obecność struktur solnych (Chociwel, Ińsko) (zał. 7).

Rejon niecki szczecińskiej charakteryzuje się bardzo dobrymi warunkami termicznymi. Stosunkowo wysokie wartości strumienia ciepłego przekładają się na wysokie wartości temperatur w głębinach. Najwyższych temperatur formacji mezozoicznej należy się spodziewać w obrębie zbiorników triasowych, jednak lokalizowanie instalacji w tych utworach wiąże się z pewnym ryzykiem uzyskania zbyt małej wydajności otworów wiertniczych. Stąd też jako utwory najbardziej perspektywiczne wskazano piaskowce warstw radowskich i mechowskich dolnej jury, występujące w rejonie Stargardu Szczecińskiego i Chociwła. Temperaturę wód zakumulowanych w tych warstwach będzie cechowała niższa wartość niż wód z poziomów triasowych, jakkolwiek w obrębie zbiornika powinny się one kształtować na poziomie 90–100°C. Skały zbiornikowe będą się charakteryzowały korzystnymi parametrami zbiornikowymi, przekładającymi się na wysokie wartości wydajności otworów wiertniczych. Mankamentem, na który należy zwrócić uwagę jest wysoka wartość mineralizacji wód występujących w rejonie niecki szczecińskiej. Dotyczy to zarówno wód zbiornika dolnojurajskiego jak i wód zbiorników triasowych. Ze względu na wyższe temperatury jak również obecność zakładu geotermalnego w Stargardzie Szczecińskim, rejon Chociwła wydaje się stanowić odpowiedniejszą lokalizację do wykorzystania wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy skojarzonym zastosowaniu układów binarnych.

#### 4.2.2. Zbiornik dolnotriasowy

(Anna Sowizdżał, Wojciech Górecki, Marek Hajto, Bartosz Papiernik)

Dolnotriasowy zbiornik hydrogeotermalny na Niżu Polskim charakteryzuje się największą powierzchnią występowania temperatur powyżej 100°C (Górecki (red.) 2006). Z tego względu wybrano

ten zbiornik (obok zbiornika dolnojurajskiego) jako potencjalnie perspektywiczny do wykorzystania zakumulowanych w nim wód termalnych do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych.

Analizując potencjał geotermalny zbiornika dolnotriasowego poszukiwano obszarów występowania wód termalnych, charakteryzujących się temperaturą wód w stropie zbiornika geotermalnego co najmniej 90°C oraz minimalną wydajnością otworu wiertniczego rzędu 20 dm<sup>3</sup>/h.

Przyjęte kryterium temperaturowe pozwoliło wytypować obszar najbardziej perspektywiczny do wykorzystania wód termalnych zbiornika dolnotriasowego do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej przy zastosowaniu układów binarnych. Aczkolwiek, biorąc pod uwagę ograniczony stan jego rozpoznania w zakresie warunków przepływu wód podziemnych oraz potencjalnych wydajności struktur, które mogłyby zostać ujęte do eksploatacji, oraz uwzględniając w znacznym stopniu występowanie na przeważającym obszarze utworów w facji iłowcowo-mułowcowej, wykorzystanie zbiornika triasowego winno być poprzedzone realizacją badań uzupełniających, w szczególności z zakresu geofizyki powierzchniowej.

Ze względu na rozkład pola termicznego obszar ten pokrywa się z obszarem wytypowanym dla utworów jury dolnej. Głębsze zaleganie zbiornika dolnotriasowego znalazło odzwierciedlenie w wyższych temperaturach w stropie tego zbiornika, co przejawia się większą powierzchnią obszaru perspektywicznego (zał. 4.2.17).

Analizowany obszar administracyjnie znajduje się na terenie województw: wielkopolskiego, kujawsko-pomorskiego, łódzkiego i warszawskiego (zał. 4.2.18). W zasięgu wytypowanego obszaru znalazło się kilka dużych miast (m.in. Konin, Łódź, Piotrków Trybunalski).

Geologicznie obszar analiz znajduje się w obrębie niecki mogileńsko-łódzkiej, niecki szczecińskiej, wału kujawskiego oraz niecki warszawskiej (zał. 4.2.17), przy czym najbardziej perspektywiczny teren, gdzie temperatura w stropie dolnego triasu przekracza 120°C znajduje się – podobnie jak w przypadku zbiornika dolnojurajskiego – w obrębie niecki mogileńsko-łódzkiej, a także częściowo w obrębie wału kujawskiego (zał. 4.2.17).

W obszarze objętym szczegółowymi analizami zlokalizowanych jest 37 otworów wiertniczych dokumentujących utwory triasu dolnego (zał. 4.2.17).

We wczesnym triasie sedymentacja na Niżu Polskim odbywała się w warunkach klimatu gorącego i suchego, w obrębie śródlądowego zbiornika morskiego o obniżonym zasoleniu, na obszarze sebhya oraz na lądzie. Osady wskazują na silne powiązanie z basenem germańskim i na transgresję z północnego zachodu (Szyperko-Teller 1997).

Dolny pstry piaskowiec na wytypowanym obszarze buduje formacja bałtycka wykształcona jako kompleks skał ilasto-mułowcowych, o barwie czerwono-brunatnej, z wkładkami wapieni oolitowych oraz piaskowców (Szyperko-Śliwczyńska 1979; Szyperko-Teller 1982). Mięjsze piaskowce tego wieku pojawiają się m.in. w otworze Florentyna IG-2, gdzie osiągają miąższość ponad 300 m.

Środkowy pstry piaskowiec jest dwudzielny. Niższa część generalnie zachowuje równoleżnikowy układ facji. W południowej części basenu dominują utwory piaskowcowe, a na obszarze południowej części niecki szczecińskiej występują utwory formacji węglanowo-klastycznej, która ku północy przechodzi w formację pomorską (Szyperko-Teller 1997). Formację pomorską tworzą dwa cyklotemy rozpoczynające się utworami piaskowcowo-oolitowymi, a kończące iłowcami o barwie czerwonej. Dolny piaskowiec wydzielany jest jako ogniwo piaskowca drawskiego, natomiast cyklotem górny jako ogniwo trzebiatowskie (Szyperko-Teller 1982). Miąższość piaskowca drawskiego dochodzi do



50 m na obszarze wału pomorskiego. Przykryty jest on 100–150 m kompleksem utworów iłowcowo-mułowcowych (Szyperko-Teller 1987). Znaczna miąższość oraz położenie pomiędzy ilastymi utworami uszczelniającymi, typują piaskowiec drawski jako potencjalne skały zbiornikowe dla wód termalnych. Formacja pomorska zazębia się w kierunku północno-wschodnim z formacją lidzbarską, zbudowaną głównie z utworów iłowcowo-mułowcowych z wkładkami wapieni oolitowych i marglistych (Szyperko-Śliwczyńska 1979).

Mięszsze utwory piaskowcowe na analizowanym obszarze spotykane są m.in. w otworach Miłosław 1 (185 m), Miłosław 2 (275 m) oraz Zakrzyń IG-1 (180 m) zlokalizowanych w zachodniej części wytypowanego obszaru perspektywicznego (zał. 4.2.17).

Sedymencję górnego pstrego piaskowca rozpoczęła ponowna transgresja morska, która spowodowała zalanie całego Niżu Polskiego. W zachodniej, południowo-zachodniej i południowej Polsce, od niecki szczecińskiej po małopolskę, dominowała sedymencja utworów wydzielanych jako ret. W dolnym odcinku są to piaskowcowo-mułowcowo-iłowcowe skały kompleksu podewaporatowego. Wyższą część profilu stanowią mięszsze utwory węglanowo-ewaporatowe, z przewarstwianiami się wapieniami, dolomitami, anhydrytami, gipsami i solami kamiennymi. Ret w wielu otworach reprezentowany jest przez utwory węglanowe (np. otwory Chociwel 3, Otoczna 1 i in.)

W większości analizowanych dokumentacji wynikowych otworów zlokalizowanych na wytypowanym obszarze perspektywicznym utwory triasu dolnego, wykształcone są w postaci litofacji iłowcowo-mułowcowych. W części wschodniej wytypowanego obszaru cały profil triasu dolnego reprezentowany jest głównie przez serię iłowcowo-mułowcową. Zaznacza się to np. w otworach zlokalizowanych na wschodzie obszaru obejmujących część niecki warszawskiej i wału kujawskiego (Bodzanów IG-1, Kutno 1, Toruń 1, Byczyna 1), jak również w otworach wysuniętych na zachód zarówno w rejonie niecki szczecińskiej (np. w otworach Gołęczewo 1, Mężyk 1) jak i obszaru przedsudeckiego (Solec 1) oraz niecki mogileńsko-łódzkiej (np. Wilczna 1).

Wśród skał klastycznych dominują utwory drobnoziarniste. Litofacje piaskowcowe występują jedynie w postaci niewielkich, odizolowanych płatów w strefach brzeżnych basenu. Otwory, w których spotkano występowanie piaskowcowych osadów triasu dolnego o znacznej miąższości to m.in.: Buków 2, Uniejów 1, Zakrzyń IG-1, Florentyna IG-2, Miłosław 1 i Miłosław 2.

W profilu otworu Piotrków Trybunalski IG-1 (Leszczyński (red.), 2007) zlokalizowanym w południowej części wytypowanego obszaru ret reprezentowany jest przez wapień, dolomity i margle, pstry piaskowiec środkowy wykształcony jest w postaci formacji ilastej o 104 m miąższości oraz niżej zalegającej formacji pomorskiej (148 m), którą budują mułowce, iłowce, piaskowce oraz wapień. Piaskowce są drobnoziarniste, często wapniste lub z przewarstwieniami mułowcowo-iłowcowymi. Pstry piaskowiec dolny o miąższości 379 m reprezentowany jest przez mułowce, iłowce i piaskowce.

Przykładowe przekroje korelacyjne dla badanego obszaru przedstawiono na załącznikach 4.2.19 i 4.2.20.

W obszarze perspektywicznym strop triasu dolnego zalega na głębokościach od około –2200 m n.p.m. do ponad –5000 m n.p.m.. w osiowej części niecki mogileńsko-łódzkiej (zał. 4.2.21). Głębokość zalegania warstw wodonośnych sprzyja wysokim temperaturom panującym w obrębie zbiornika triasu dolnego. Cały wytypowany obszar charakteryzuje się temperaturą w stropie zbiornika dolnotriasowego przekraczającą 90°C (zał. 4.2.23). Należy pamiętać, że przy znacznych miąższościach triasu dolnego temperatura w obrębie zbiornika będzie odpowiednio wyższa. Również

rejony otaczające obszar perspektywiczny mogą się okazać interesujące, gdyż pomimo występowania niższej temperatury w stropie zbiornika niż przyjęte 90°C, w obrębie warstwy, temperatura ta może być odpowiednio wyższa (przy miąższości triasu dolnego 1000 m, temperatura w głębiej zalegających piaskowcowych utworach pstrego piaskowca dolnego może przekroczyć 100°C). Najwyższych temperatur należy spodziewać się w osiowej części niecki mogileńsko-łódzkiej, gdzie strop triasu dolnego zalega najgłębiej. Temperatury w stropie przekraczają w tym rejonie 150°C, co przy miąższościach triasu dolnego w tym rejonie, przekraczającym 1000 metrów, może sugerować temperaturę w spągu poziomu zbiornikowego nawet 180°C.

Miąższość całkowita utworów pstrego piaskowca zmienia się od około 400 metrów w brzeżnych partiach obszaru badań (fragment niecki szczecińskiej oraz niecki warszawskiej) do ponad 1800 metrów. Największą miąższość utworów triasu dolnego odnotowano w otworze Kutno 1 (1846,5 m) (zał. 4.2.22).

Niestety, duża głębokość zalegania utworów pstrego piaskowca, mająca korzystny wpływ na temperaturę w obrębie warstwy wodonośnej, nie wpływa korzystnie na mineralizację wód oraz na właściwości zbiornikowe tych warstw.

Na wysokie wartości mineralizacji wód w tym rejonie oprócz dużej głębokości zalegania warstw zbiornikowych ma również wpływ obecność struktur solnych (poduszka solna Trzemżala, Uniejowa, słup solny Kłodawy, Ponętowa i Damasławka). Wody analizowanego zbiornika cechują się stosunkowo wysokimi wartościami mineralizacji kształtującej się w granicach od około 140 g/dm<sup>3</sup>, w brzeżnych strefach obszaru (niecka warszawska, obszar przedsudecki) do ponad 350 g/dm<sup>3</sup> w głęboko pograżonych strefach basenu (osiowe fragmenty niecki mogileńsko-łódzkiej, niecki szczecińskiej) (zał. 4.2.24).

Parametry zbiornikowe warstw wodonośnych triasu dolnego są znacznie słabsze od wcześniej analizowanych parametrów zbiornikowych dolnej jury. Na wytypowanym obszarze osady triasu dolnego zalegają bardzo głęboko, co powoduje pogorszenie parametrów zbiornikowych. Lepsze parametry zbiornikowe charakteryzują utwory triasu dolnego zalegającego płycej, np. piaskowce północnej części antyklinorium pomorskiego mają porowatość rzędu 23–27% i przepuszczalność 567 mD. Jednak występują one stosunkowo płytko co powoduje, że temperatury w obrębie zbiornika są niskie. Przykładowo, w otworze Kamień Pomorski 2, z głębokości 1300 m uzyskano przyptyw 19,4 m<sup>3</sup>/h wody o temperaturze 38°C. W otworze Bydgoszcz IG-1 leżącym nieco na północ od wytypowanego obszaru po opróbowaniu piaskowców w stropie (1820 m p.p.t.) uzyskano przyptyw 8,9 m<sup>3</sup>/h wody o temperaturze 53°C i mineralizacji 199 g/dm<sup>3</sup>.

W otworze Szwejki IG-3 leżącym na NE od analizowanego rejonu na obszarze synklinorium warszawskiego, osady triasu dolnego zalegają poniżej 3680 m, porowatość skał zbiornikowych wynosi 12%, a przepuszczalność 122 mD, mineralizacja wód złożowych kształtuje się na poziomie 246 g/dm<sup>3</sup>, a temperatura 85°C.

Porowatości dolnotriasowych warstw zbiornikowych określone zostały na podstawie badań laboratoryjnych wykonanych na rdzeniach w kilku otworach wiertniczych rejonu badań, m.in.: Buków 1, Buków 2, Różyce IG-2, Toruń 1, Uniejów 1, Florentyna IG-2, Kompina 2, Kutno 1, Trześniew 1, Byczyna 1, Bodzanów IG-1 (Górecki (red.) 2006). W otworach Zgierz IG-1 i Solec 1 nie stwierdzono występowania warstw zbiornikowych (porowatość <5%). W otworze Buków 2 porowatość efektywna w piaskowcowych utworach pstrego piaskowca dolnego zmienia się w zakresie od około 5% do ponad 18,5%. Z kolei w otworze Uniejów 1 porowatość skał zbiornikowych triasu dolnego wynosi

ponad 15%. W utworach retu w otworze Różyce IG-2 stwierdzono występowanie skał klastycznych o porowatości 5,6%. W otworze Toruń 1 utwory triasu dolnego reprezentowane są głównie przez iłowce o porowatości 5–8%. Dla trzynastu otworów obliczono średnie ważone porowatości całkowite wszystkich utworów budujących profil triasu dolnego. Przyjmują one niskie wartości od 0,13 do 3,98%. Potwierdza to fakt, że w analizowanym rejonie miększe utwory piaskowcowe o dobrych parametrach zbiornikowych występują sporadycznie.

Średnia przepuszczalność warstw zbiornikowych triasu dolnego rozprzestrzeniających się na obszarze Niżu Polskiego wynosi 145,5 mD (Górecki (red.) 2006). Poszczególne wyniki pomiarów cechują się jednak bardzo dużym zróżnicowaniem od praktycznie 0 do ponad 9000 mD, co będzie powodowało bardzo duże odchylenie od podanej średniej. W otworze Wałdowo Królewskie-1 przepuszczalność piaskowców zalegających na głębokości 2515 m p.p.t. wynosi 9456 mD. Jednak w większości pozostałych otworów przepuszczalności są niskie (rzędu kilku mD). Znaczne przepuszczalności mają piaskowce w części południowej i wschodniej Niżu Polskiego, gdzie następuje wynurzenie osadów ku powierzchni, a zarazem wzrasta ilość piaskowców w profilu i polepszenie parametrów zbiornikowych: przepuszczalności w piaskowcach o porowatościach 20% dochodzą do 610 mD. Z otworu Nadarzyn IG-1 otrzymano przyptyw wody złożowej w ilości 16 m<sup>3</sup>/h. W otworze Maciejowice IG-1 piaskowce o porowatości 26–29% mają przepuszczalność 5000 mD (w gł. 1750 m p.p.t.), 1400 mD w otworze Warka IG-1 (z głębokości 2220 m p.p.t.). W otworze tym otrzymano przyptyw 16,8 m<sup>3</sup>/h solanki o mineralizacji 144 g/dm<sup>3</sup>. Z wyższego poziomu (2108 m p.p.t.) otrzymano wydajność 25 m<sup>3</sup>/h. W otworze Pionki-3 piaskowce o porowatości 28% mają przepuszczalność 7807 mD.

Analizy parametrów zbiornikowych wykonywane na obszarze niecki warszawskiej (Górecki (red.) 1999), gdzie dla określenia warunków hydrogeologicznych zbiornika dolnotriasowego przeprowadzono analizy 154 danych laboratoryjnych współczynnika przepuszczalności (*kp*) i 100 porowatości efektywnej (*ne*) oraz wykonano interpretacje materiału geofizycznego dla 9 otworów pokazują, że współczynnik przepuszczalności *kp* zawiera się w granicach 0,1–761 mD, a dla danych pochodzących z geofizyki 1,1–369 mD (średnia ważona wynosi 70 mD). Porowatość efektywna nie zawiera się w przedziale 2–30% przy średniej arytmetycznej 5,7%.

Na wytypowanym obszarze – obejmującym zarówno fragment niecki warszawskiej, obszaru przedsudeckiego, jak również wał kujawski oraz nieckę mogileńsko-łódzką – przepuszczalność przyjmuje niskie wartości. Z danych zawartych w Bazie Danych KSE wynika, że w większości badanych rdzeni występowały skały o niskiej przepuszczalności od 0 do około 11 mD. Dysponowano 57 wynikami przepuszczalności pomierzonymi w 11 otworach wiertniczych zlokalizowanych w obszarze badań. Pomiary wykonywane były na rdzeniach zbudowanych najczęściej z iłowców, mułowców, lokalnie wapieni, rzadko piaskowców. Przykładowo: występujące w otworze Buków 1 zailone piaskowce charakteryzują się przepuszczalnością bliską 0.

Analizując wyniki przepuszczalności z rdzeni pobranych w otworach rejonu badań należy stwierdzić, że przyjęta dla całego Niżu Polskiego średnia przepuszczalność skał zbiornikowych na poziomie 145,5 mD (Górecki (red.) 2006) nie odzwierciedla przepuszczalności wytypowanego obszaru. Strop utworów dolnego triasu na wytypowanym obszarze zalega bardzo głęboko. Na pozostałym obszarze Niżu Polskiego

warstwy wodonośne triasu dolnego zalegają płycej. W głęboko położonych strefach centralnych basenu czynnikiem korzystnym jest wysoka temperatura złożowa wód, natomiast skały wodonośne, reprezentowane przez głębsze facje basenu, poddane zmianom diagenetycznym posiadają gorsze właściwości zbiornikowe, co ogranicza wydajności i możliwości zatłaczania wody w warstwę chłonną.

Z analizowanych pomiarów petrofizycznych (porowatość, przepuszczalność) wynika, że na wytypowanym obszarze należy spodziewać się raczej słabych parametrów zbiornikowych, przekładających się na niskie wydajności otworów wiertniczych.

Autorzy dokonali symulacji obliczeń potencjalnej wydajności otworów wiertniczych w utworach triasu dolnego z przyjęciem kilku potencjalnych współczynników przepuszczalności.

Obliczeń dokonano – podobnie jak dla utworów jury dolnej – zgodnie z metodyką opracowaną w Katedrze Surowców Energetycznych Akademii Górniczo-Hutniczej. Metodyka została szczegółowo przedstawiona w rozdziale 4.2.

Wykonano obliczenia i wykreślono mapy potencjalnych wydajności otworów wiertniczych w utworach triasu dolnego (niepublikowane) w trzech wariantach:

1) optymistycznym (ale mało realistycznym) – przy założeniu przepuszczalności skał zbiornikowych na poziomie wartości średniej z Niżu Polskiego (145,5 mD) – uzyskano wydajności z zakresu od 20 do ponad 100 m<sup>3</sup>/h,

2) możliwym – przy założeniu przepuszczalności skał zbiornikowych na poziomie wartości średniej z rejonu niecki warszawskiej (70 mD) – uzyskano wydajności z zakresu od około 20 do 57 m<sup>3</sup>/h,

3) realistycznym – przy założeniu przepuszczalności na poziomie wartości średniej z analizowanych danych laboratoryjnych (bardzo niska, około 0,6 mD) – nie uzyskano wydajności minimalnej (20 m<sup>3</sup>/h) do lokalizowania instalacji binarnych.

Reasumując powyższe rozważania należy spodziewać się **niskich wydajności otworów wiertniczych** w utworach triasu dolnego. Potwierdzają to wyniki badań mających na celu rozpoznanie potencjału skał osadowych Polski dla niekonwencjonalnych systemów geotermicznych (EGS/HDR), w przypadku których skały zbiornikowe charakteryzują się niskimi wartościami przepuszczalności i porowatości.

Podsumowując przeprowadzaną analizę należy podkreślić, że utwory dolnotriasowe zalegają na wytypowanym obszarze bardzo głęboko (lokalnie nawet powyżej 5000 m p.p.t.). Wpływa to korzystnie na temperaturę panującą w zbiorniku, jednak negatywnie na parametry zbiornikowe. W głębokich strefach basenu utwory triasu dolnego charakteryzują się niskimi wartościami porowatości i przepuszczalności, co będzie miało odzwierciedlenie w uzyskiwanych niskich wydajnościach otworów wiertniczych. Co więcej, osady triasu dolnego bardzo często wykształcone są w formie serii ilasto-mułowcowych z nielicznymi tylko wkładkami piaskowców.

Potencjalnych miejsc do lokalizacji instalacji binarnych w utworach triasu dolnego należy poszukiwać w tej części wytypowanego obszaru, gdzie trias dolny zalega płycej (ok. 3000 m p.p.t.), np. w strefie Poznań–Konin–Kalisz, jednak brak wyników badań petrofizycznych z otworów tego rejonu uniemożliwia poprawne szacowanie istniejących tam parametrów zbiornikowych.



Zał. 4.2.1

MAPA LOKALIZACJI  
OTWORÓW WIERTNICZYCH  
DLA ZBIORNIKA JURY DOLNEJ  
(NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA)

Encl. 4.2.1

MAP OF BOREHOLE LOCATIONS  
FOR THE LOWER JURASSIC  
RESERVOIR  
(MOGILNO-ŁÓDŹ TROUGH)

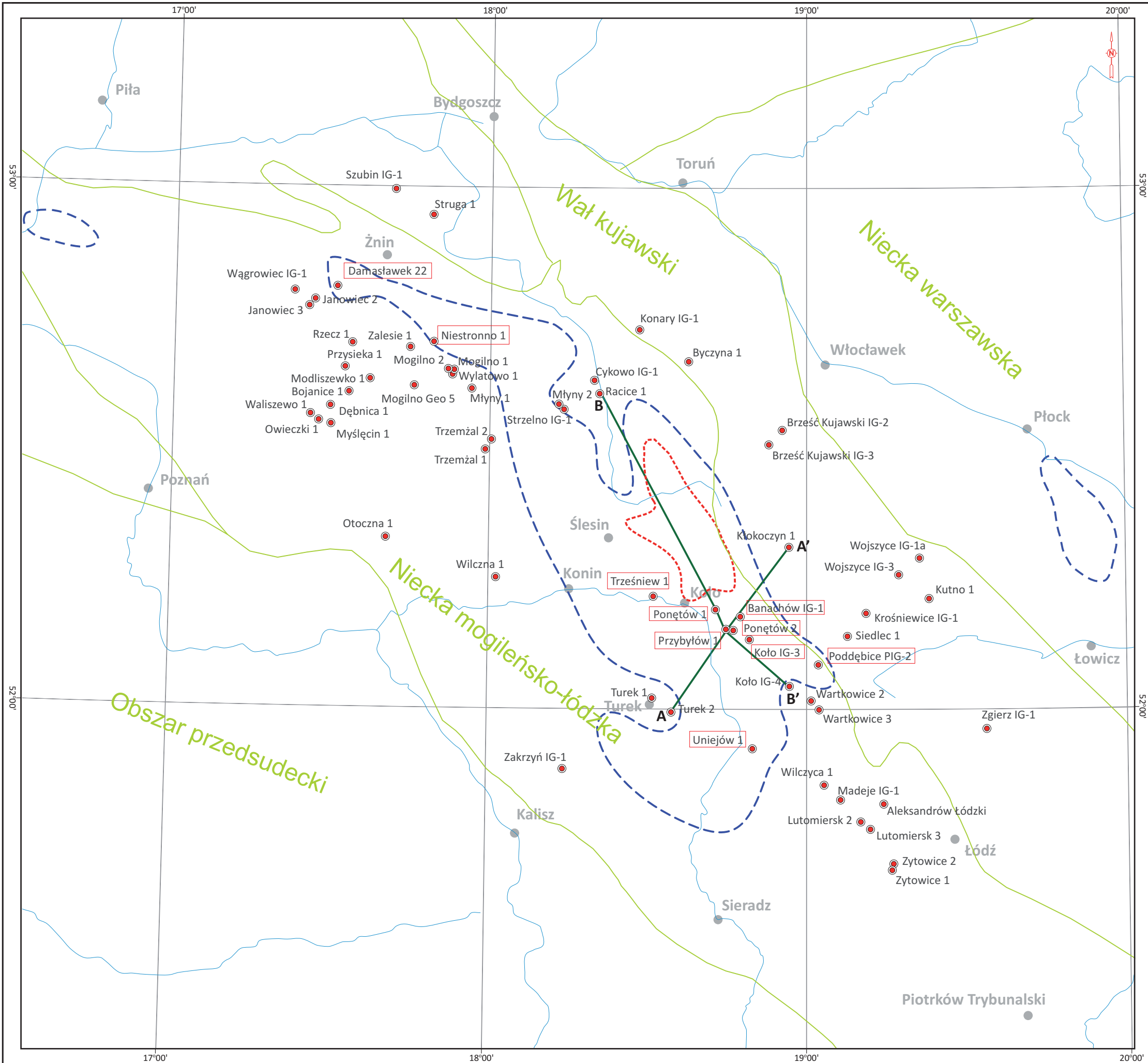
LEGENDA:  
LEGEND:

-  Ważniejsze miasta  
Main cities
-  Boreholes in the perspective area
-  Boreholes in the surrounding of perspective area
-  Boundary of the perspective area
-  The area with the temp. over 120°C in the top of the Lower Jurassic
-  Structural units
-  Line of correlative cross section (zał. 4.2.3 i 4.2.4) (encl. 4.2.3 and 4.2.4)
-  Rivers

0 25 50 km



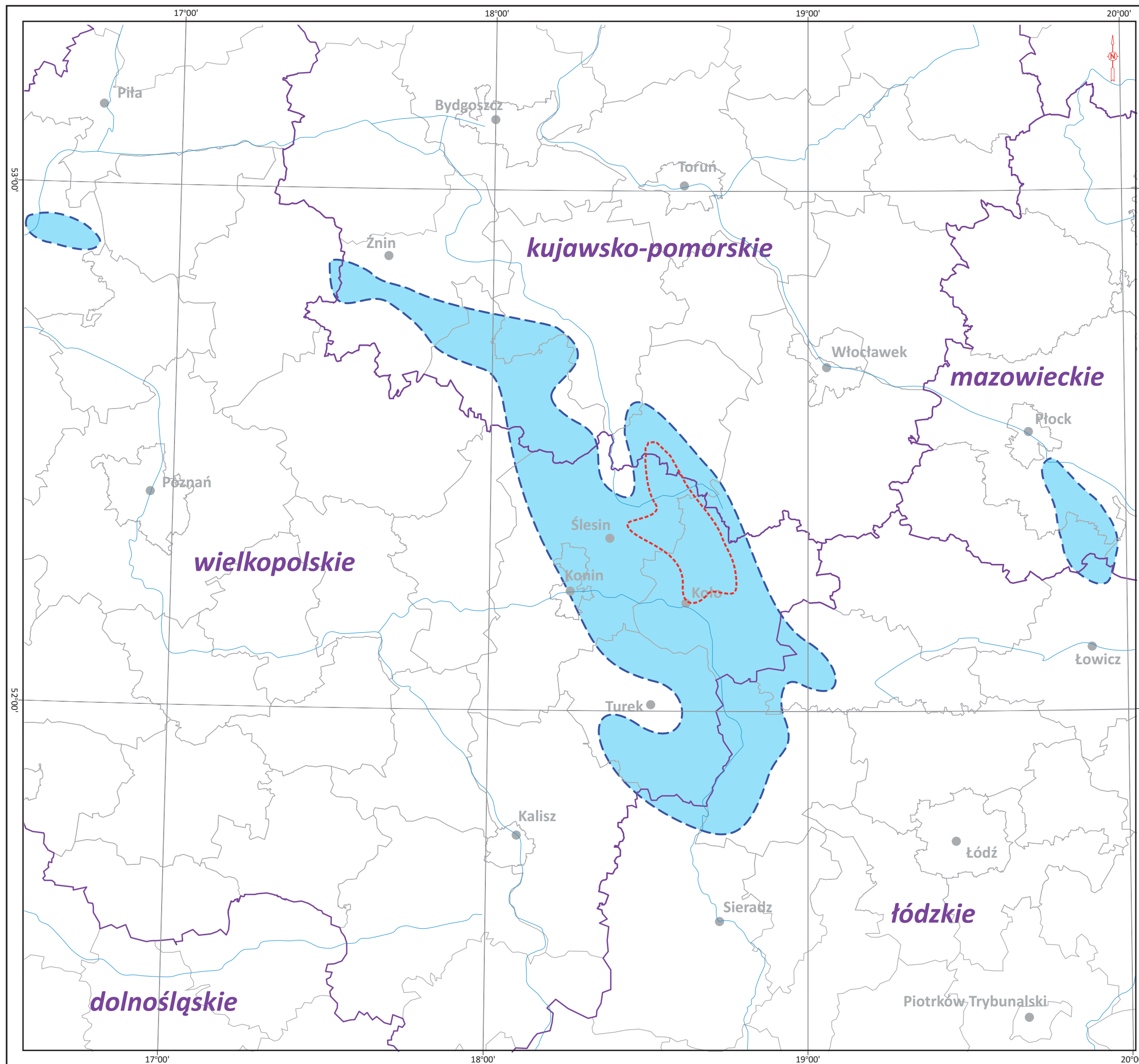
WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁĄCONE PRZECZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ



LOKALIZACJA OBSZARU  
PERSPEKTYWICZNEGO DLA  
ZBIORNIKA JURY DOLNEJ  
NA TLE PODZIAŁU  
ADMINISTRACYJNEGO POLSKI

Encl. 4.2.2

MAP OF THE LOCATION OF THE  
PROSPECTIVE AREA FOR THE  
LOWER JURASSIC RESERVOIR  
IN RELATION TO POLISH  
ADMINISTRATIVE BOUNDARIES



## LEGENDA:

## LEGEND:

- Płock Ważniejsze miasta  
Main cities
- Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the prospective area
- Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie jury dolnej  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Jurassic
- Granica województwa  
Border of voivodeship
- Granica powiatu  
Border of county
- Rzeki  
Rivers

0 25 50 km





**PRZEKRÓJ KORELACYJNY A-A'**  
(przebieg na zał. 4.2.1)

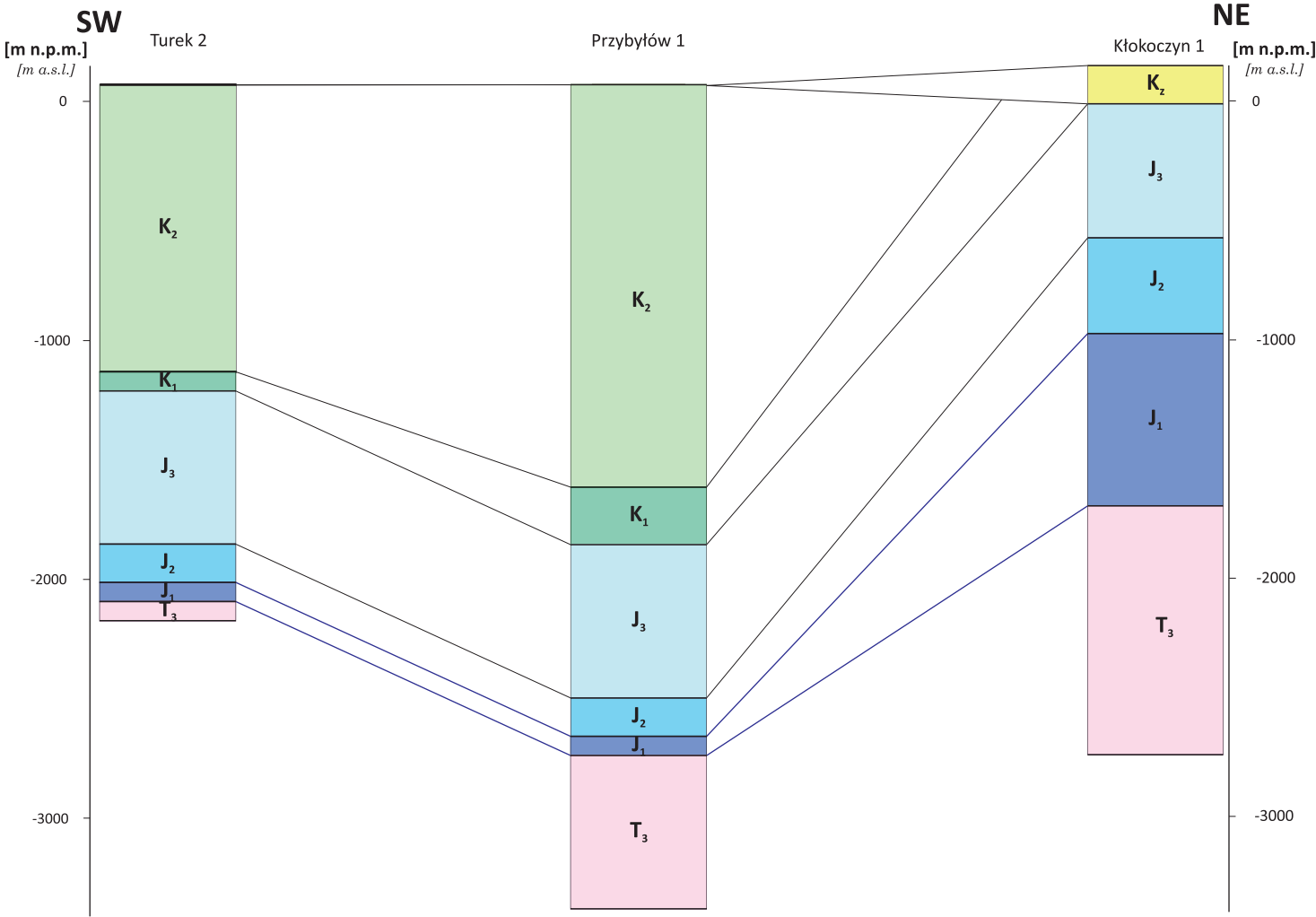
**CROSS-SECTIONAL CORRELATION A-A'**  
(line at encl. 4.2.1)

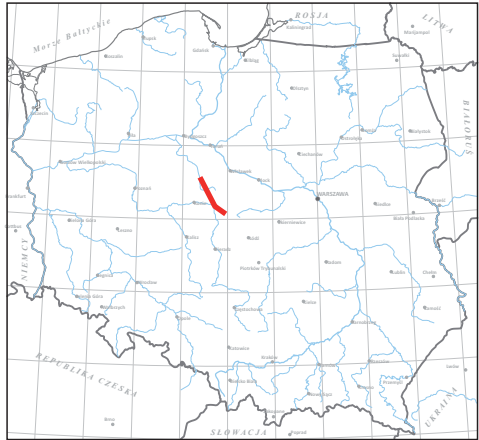
**Zał. 4.2.3**  
*Encl. 4.2.3*

**A**

**A'**

**NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA**

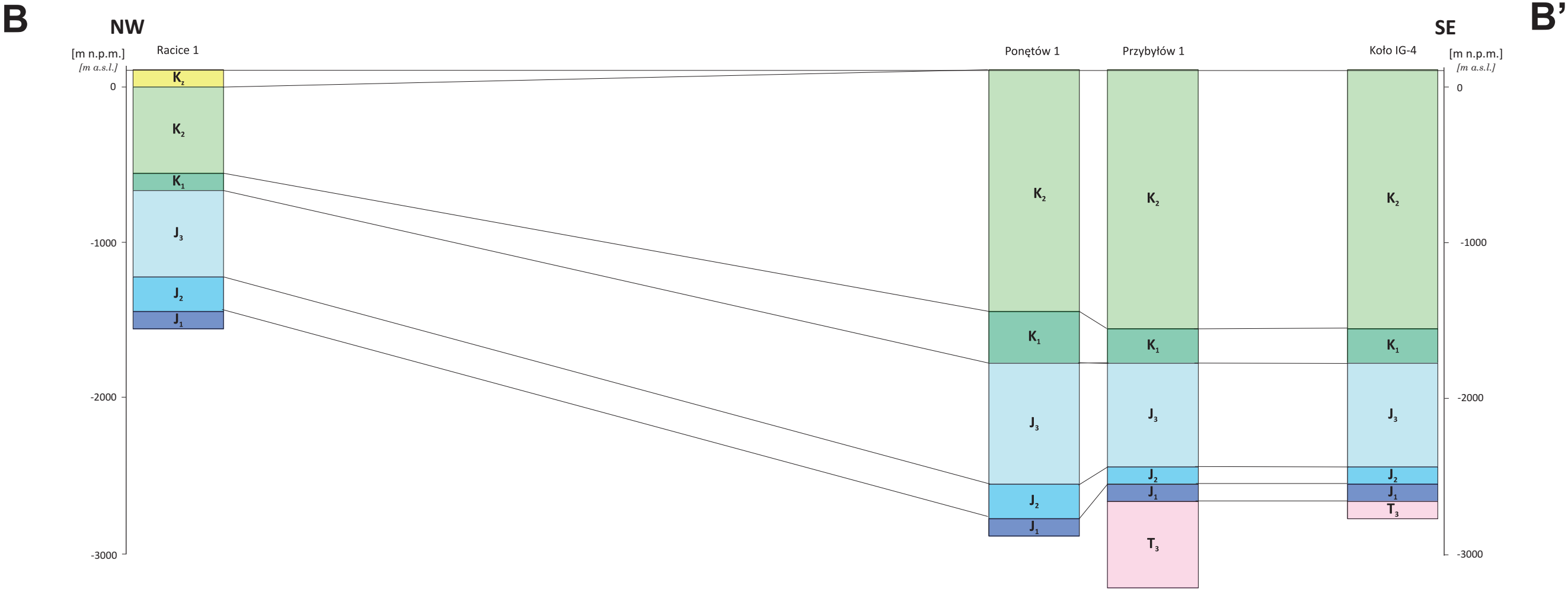




PRZEKRÓJ KORELACYJNY B-B'  
(przebieg na zał. 4.2.1)  
CROSS-SECTIONAL CORRELATION B-B'  
(line at encl. 4.2.1)

Zał. 4.2.4  
Encl. 4.2.4

NIECKA MOGILEŃSKO-LÓDZKA



K<sub>z</sub>

Kenozoik  
Cenozoic

K<sub>2</sub>

Kreda górna  
Upper Cretaceous

J<sub>3</sub>

Jura górna  
Upper Jurassic

T<sub>3</sub>

Trias górny  
Upper Triassic

Ponętów 1

Otwór  
Borehole

K<sub>1</sub>

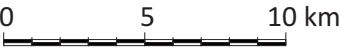
Kreda dolna  
Lower Cretaceous

J<sub>2</sub>

Jura środkowa  
Middle Jurassic

J<sub>1</sub>

Jura dolna  
Lower Jurassic





MAPA STRUKTURALNA  
STROPU UTWORÓW JURY DOLNEJ  
(NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA)\*

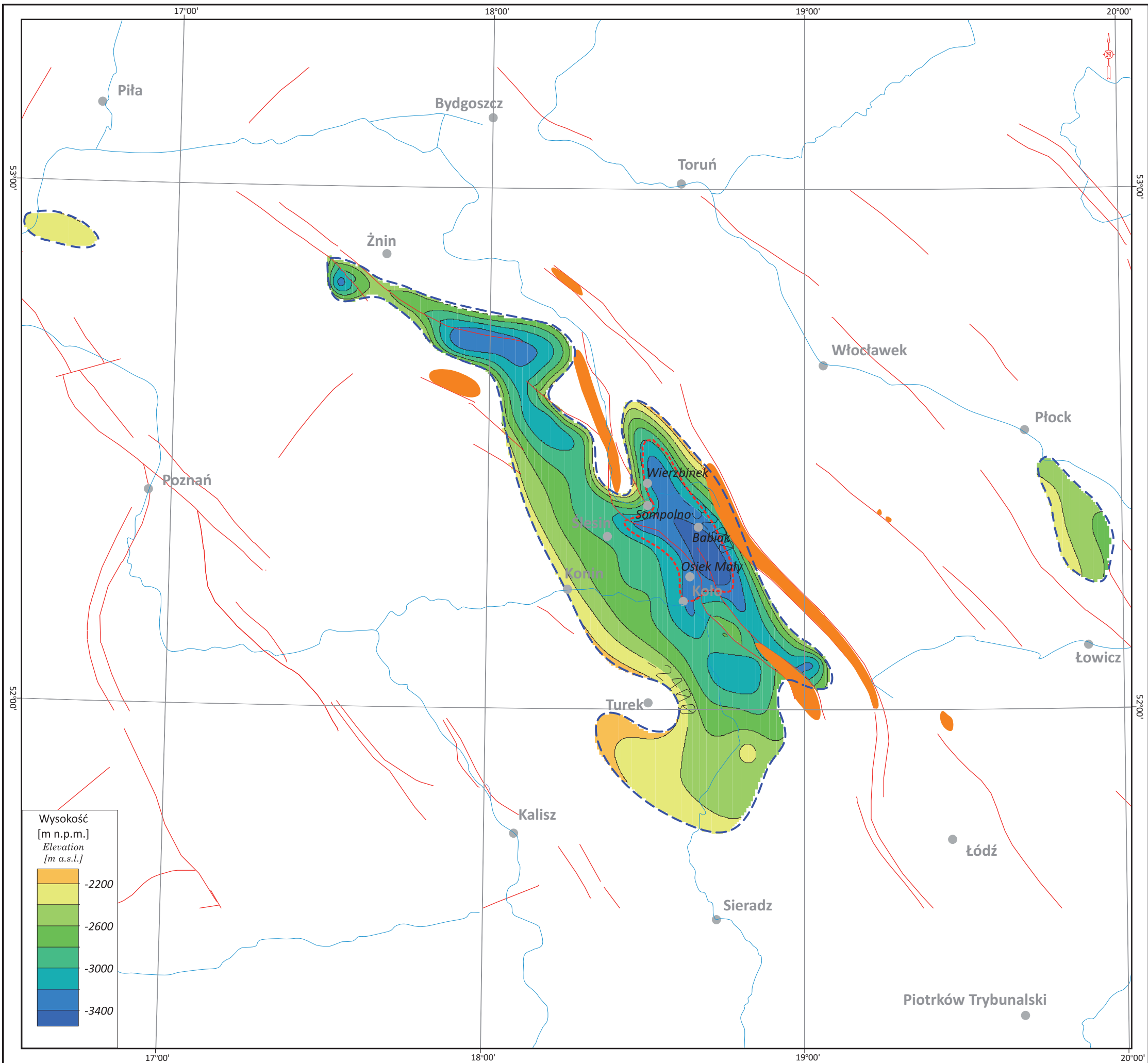
STRUCTURAL MAP  
OF THE TOP OF THE  
LOWER JURASSIC FORMATIONS  
(MOGILNO-ŁÓDŹ TROUGH)

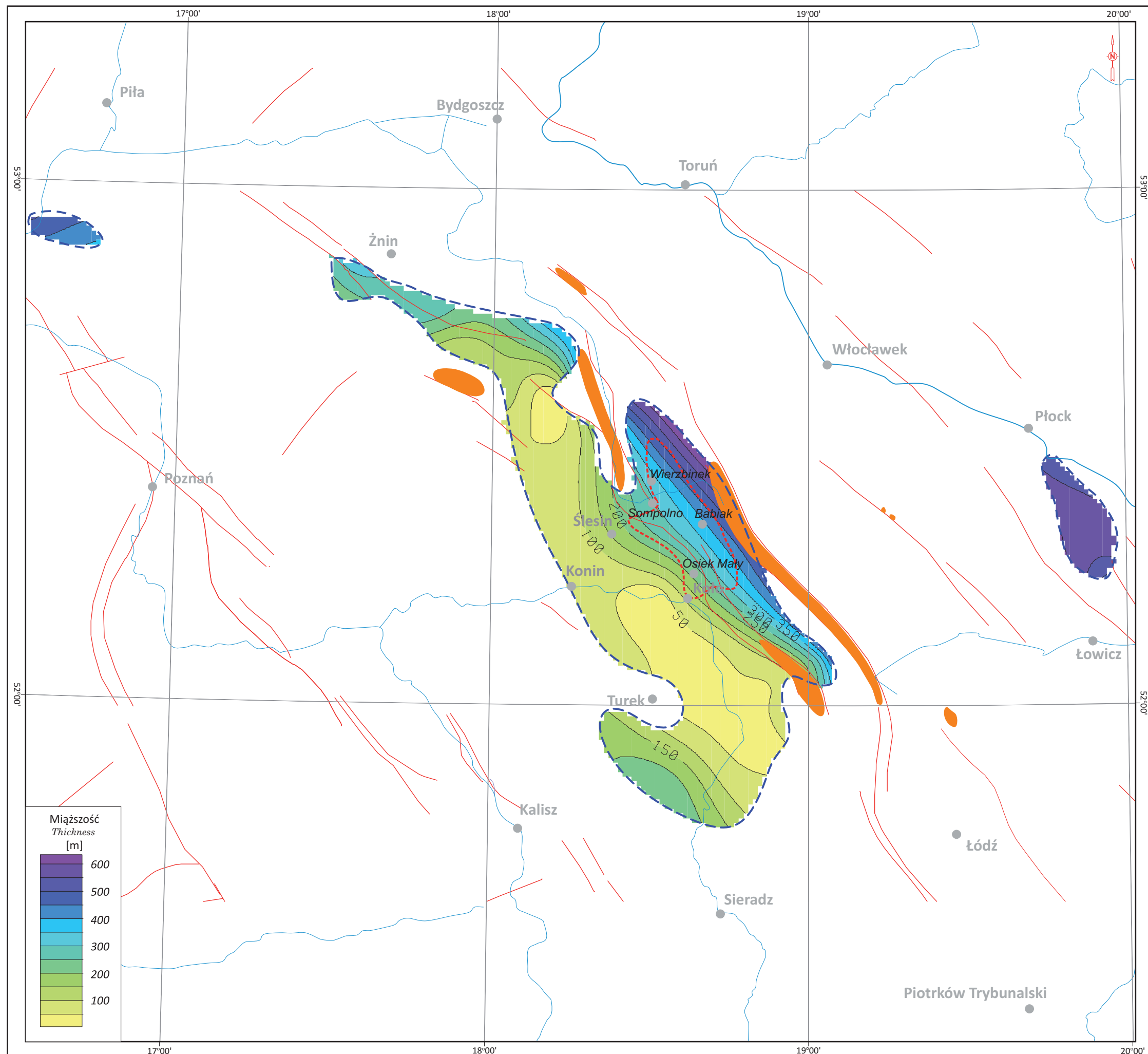
\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:  
LEGEND:

-  **Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
-  **Babiak** Mniejsze miejscowości  
Other cities
-  Granica obszaru perspektywnego  
Boundary of the perspective area
-  Uskoki  
Faults
-  Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie jury dolnej  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Jurassic
-  Struktury solne  
Salt structures
-  50 Izohipsy stropu utworów  
jury dolnej [m n.p.m.]  
Isohyps of the top of Lower Jurassic  
formation [m a.s.l.]
-  Rzeki  
Rivers

0 25 50 km





**Załącznik 4.2.6**  
**MAPA MIĄŻSZOŚCI CAŁKOWITEJ**  
**UTWORÓW JURY DOLNEJ**  
**(NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA)\***

**Encl. 4.2.6**  
**MAP OF TOTAL THICKNESS**  
**OF THE LOWER JURASSIC**  
**FORMATION**  
**(MOGILNO-ŁÓDŹ TROUGH)**

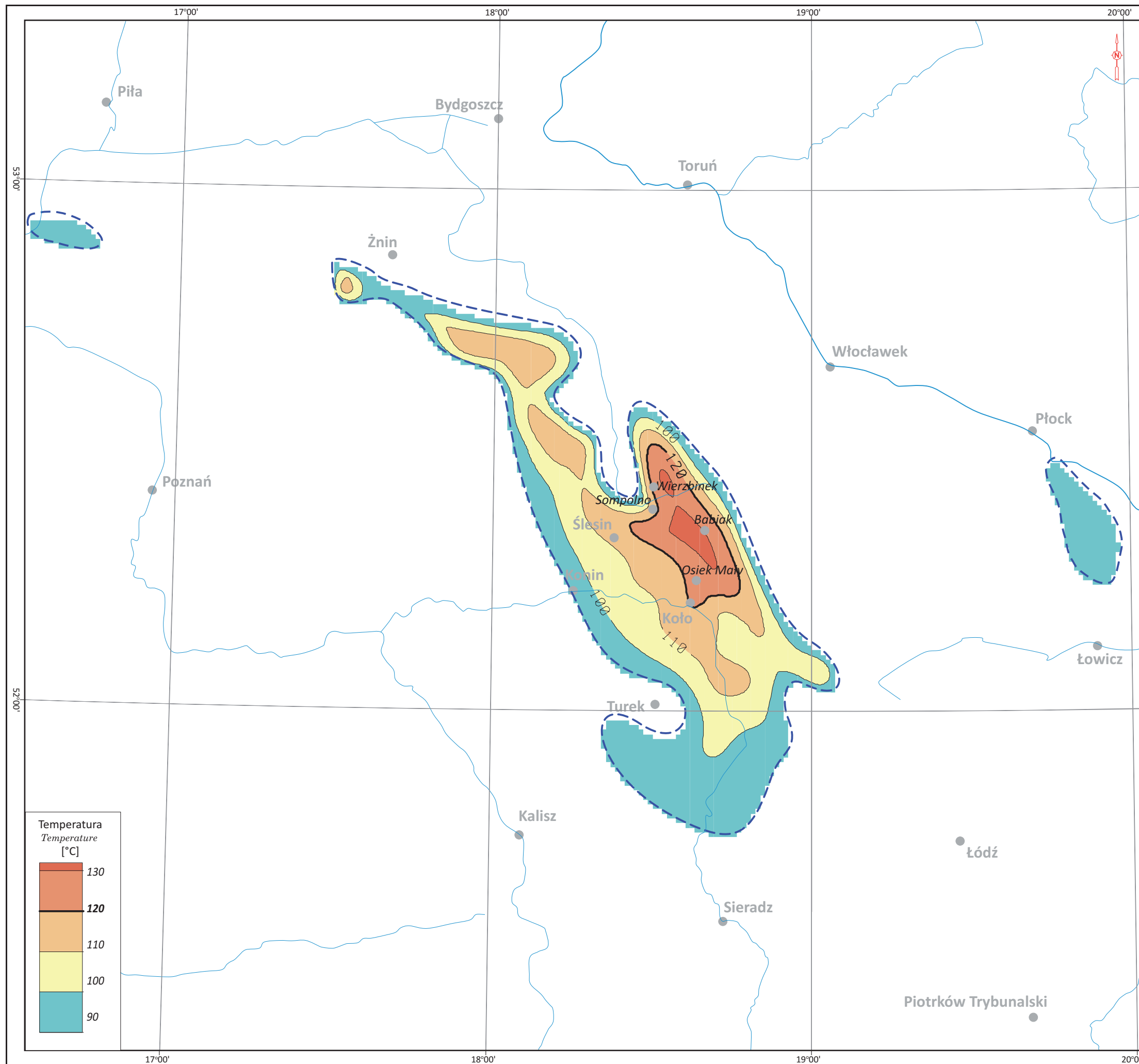
\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

**LEGENDA:**  
**LEGEND:**

- Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
- Babiak** Mniejsze miejscowości  
Other cities
- Granica obszaru perspektywicznego**  
Boundary of the perspective area
- Uskoki**  
Faults
- Obszar o temp. ponad 120°C w stropie jury dolnej**  
The area with the temp. over 120°C in the top of the Lower Jurassic
- Struktury solne**  
Salt structures
- Izopachyty utworów jury dolnej [m]**  
Isopachytes of Lower Jurassic formation [m]
- Rzeki**  
Rivers

0 25 50 km





**Załącznik 4.2.7**

**MAPA TEMPERATURY  
W STROPIE UTWORÓW  
JURY DOLNEJ  
(NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA)\***

**Encl. 4.2.7**

**MAP OF TEMPERATURE  
IN THE TOP OF THE  
LOWER JURASSIC FORMATION  
(MOGILNO-ŁÓDŹ TROUGH)**

\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

**LEGENDA:**

**LEGEND:**

**Płock**

●

Ważniejsze miasta  
Main cities

**Babinek**

●

Mniejsze miejscowości  
Other cities

---

Granica obszaru perspektywnego  
Boundary of the perspective area

50

Izotermy stropu utworów  
jury dolnej [°C]  
Isotherms at the top of Lower Jurassic  
formation [°C]

—

Rzeki  
Rivers

0 25 50 km



MINISTERSTWO  
ŚRODOWISKA



AGH  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Łukaszczyka  
w Krakowie



NARODOWY FUNDUSZ  
OCHRONY ŚRODOWISKA I  
GOSPODARKI WODNEJ



INSTITUT  
GEODEZJI I  
KARTOGRAFII



INSTITUT  
GEOLOGII I  
GÓRNICZWA

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE  
PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

Zał. 4.2.8

MAPA MINERALIZACJI WODY  
W STROPIE UTWORÓW  
JURY DOLNEJ  
(NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA)\*

Encl. 4.2.8

MAP OF WATER MINERALIZATION  
IN THE TOP OF THE  
LOWER JURASSIC FORMATION  
(MOGILNO-ŁÓDŹ TROUGH)\*

\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

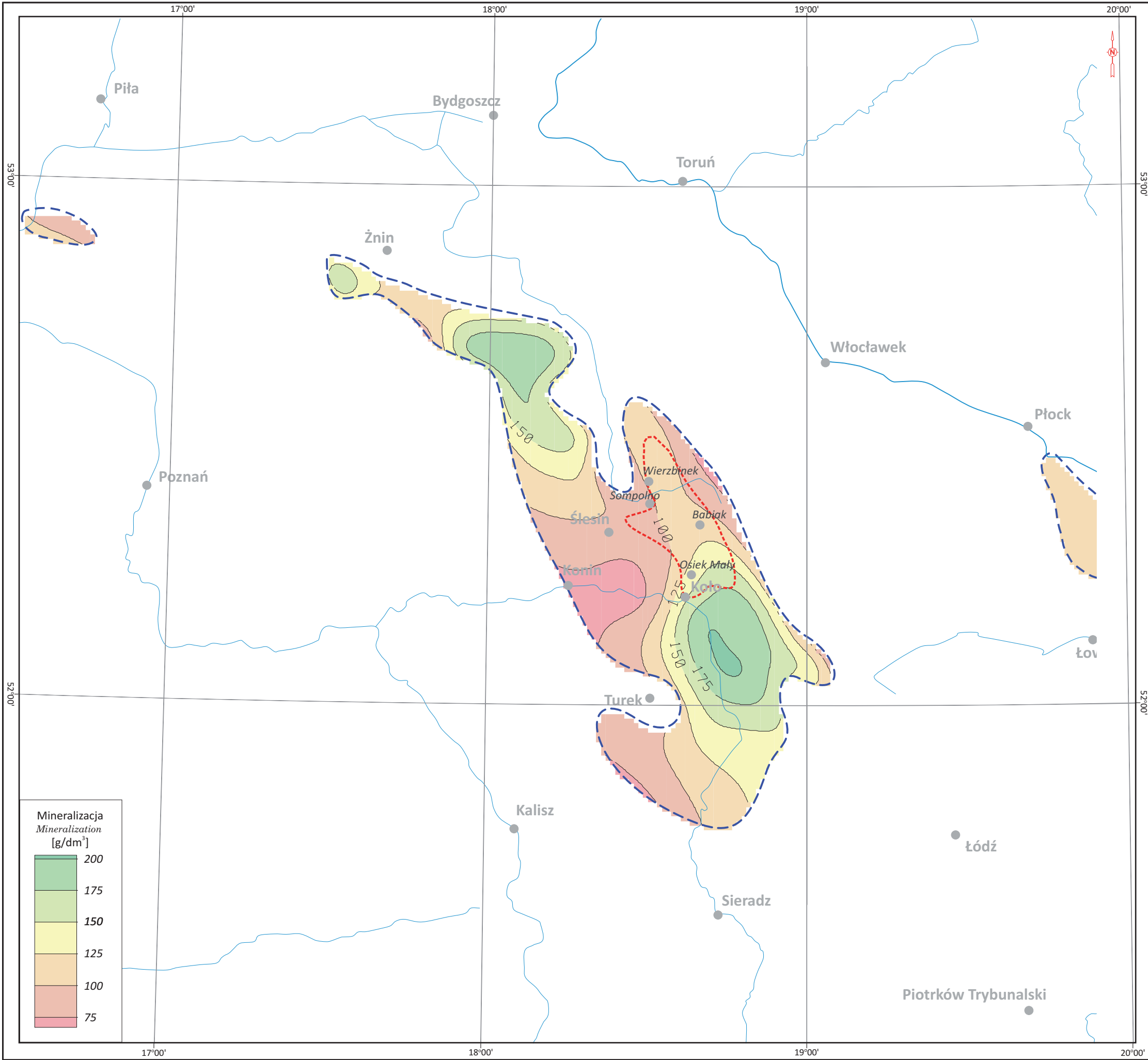
LEGENDA:  
LEGEND:

-  **Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
-  **Babiak** Mniejsze miejscowości  
Other cities
-  Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
-  Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie jury dolnej  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Jurassic
-  Izolinie mineralizacji [g/dm<sup>3</sup>]  
Isolines of TDS [g/dm<sup>3</sup>]
-  Rzeki  
Rivers

0 25 50 km



WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE  
PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ





MAPA WYDAJNOŚCI POTENCJALNEJ  
OTWORÓW WIERTNICZYCH  
W UTWORACH JURY DOLNEJ  
(NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA)\*

MAP OF POTENTIAL DISCHARGE  
OF BOREHOLES IN THE  
LOWER JURASSIC FORMATION  
(MOGILNO-ŁÓDŹ TROUGH)

\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:

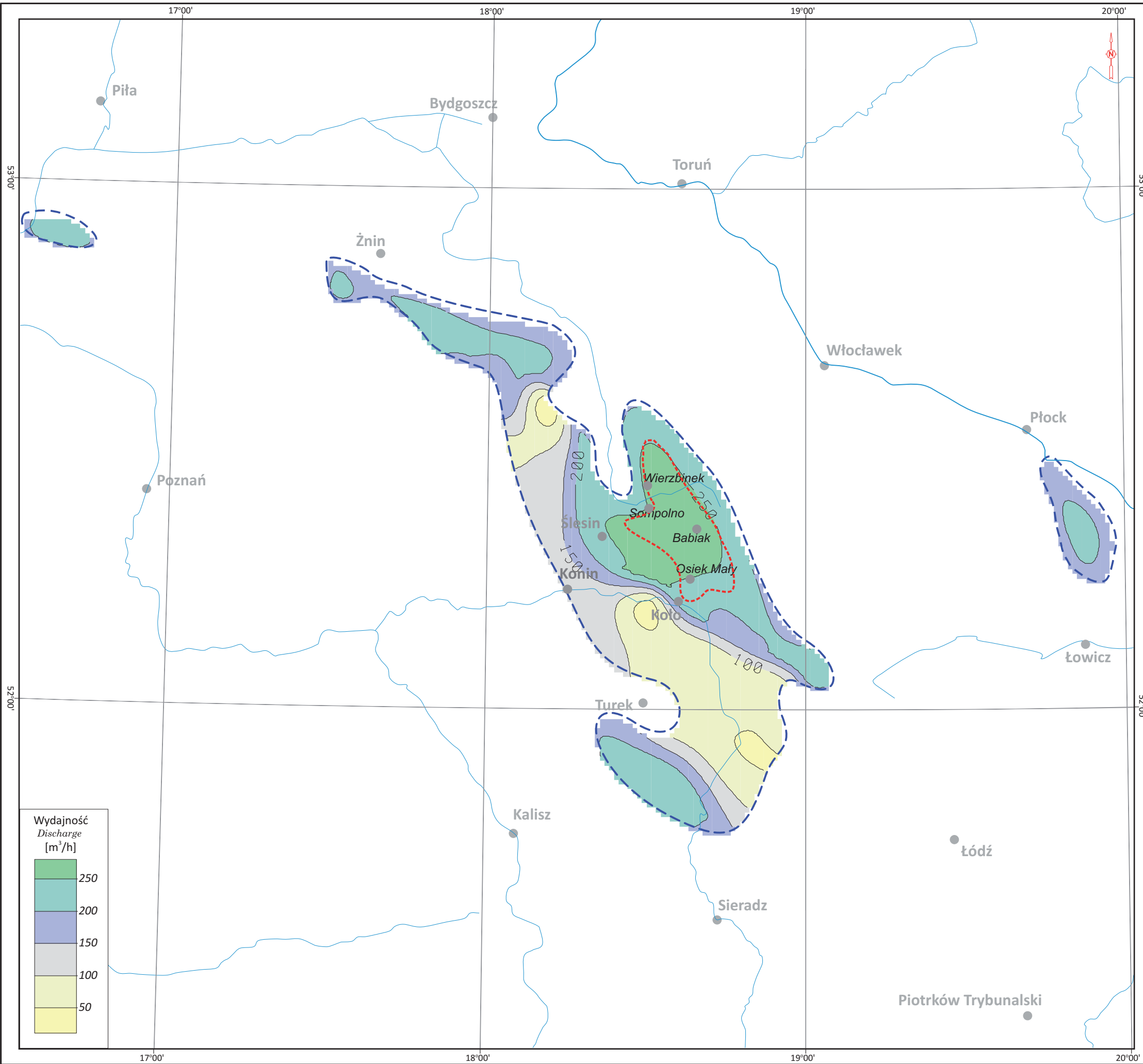
LEGEND:

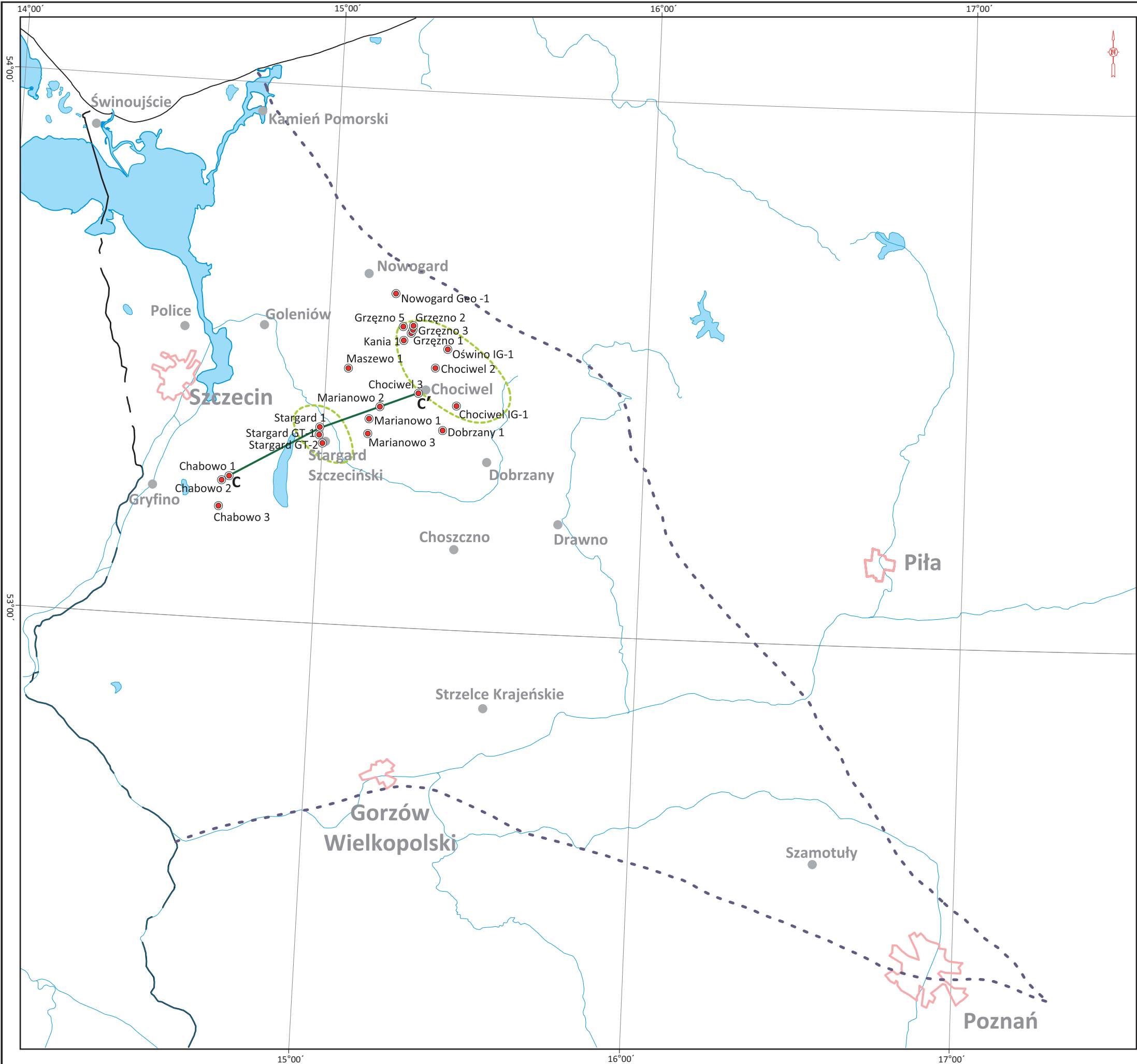
- Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
- Babiał** Mniejsze miejscowości  
Other cities
- Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
- Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie jury dolnej  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Jurassic
- Izolinie wydajności [m³/h]  
Isolines of discharge [m³/h]
- Rzeki  
Rivers

0 25 50 km



WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE  
PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ





**Zał. 4.2.10**

**MAPA LOKALIZACJI  
OTWORÓW WIERTNICZYCH  
I OBSZARU PERSPEKTYWICZNEGO  
DLA ZBIORNIKA JURY DOLNEJ  
NA TLE PODZIAŁU  
ADMINISTRACYJNEGO POLSKI  
(CENTRALNA CZĘŚĆ NIECKI  
SZCZECIŃSKIEJ)**

**Encl. 4.2.10**

**MAP OF GEOTHERMAL BOREHOLES  
AND LOCATION OF THE  
PROSPECTIVE AREA FOR THE  
LOWER JURASSIC RESERVOIR  
IN RELATION TO POLISH  
ADMINISTRATIVE BOUNDARIES  
(CENTRAL PART OF THE  
SZCZECIN TROUGH)**

**LEGENDA:**

**LEGEND:**

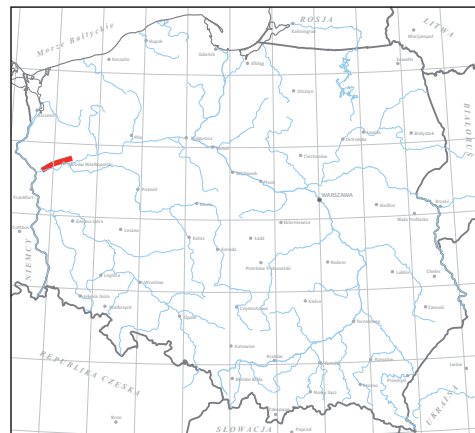
- Większe miasta  
Main cities
- Chociwel  
Mniejsze miejscowości  
Other cities
- Otwory wiertnicze  
Boreholes
- Izoterma 90°C w spągu jury dolnej  
Isotherm 90°C in the bottom of Lower Jurassic
- Granica niecki szczecińskiej  
Boundary of the Szczecin Trough
- Linia przekroju korelacyjnego  
(zał. 4.2.11)  
Line of correlative cross-section  
(encl. 4.2.11)
- Rzeki  
Rivers
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
- Granica państwa  
National border
- Linia brzegowa  
Shoreline

0 25 50 km



WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

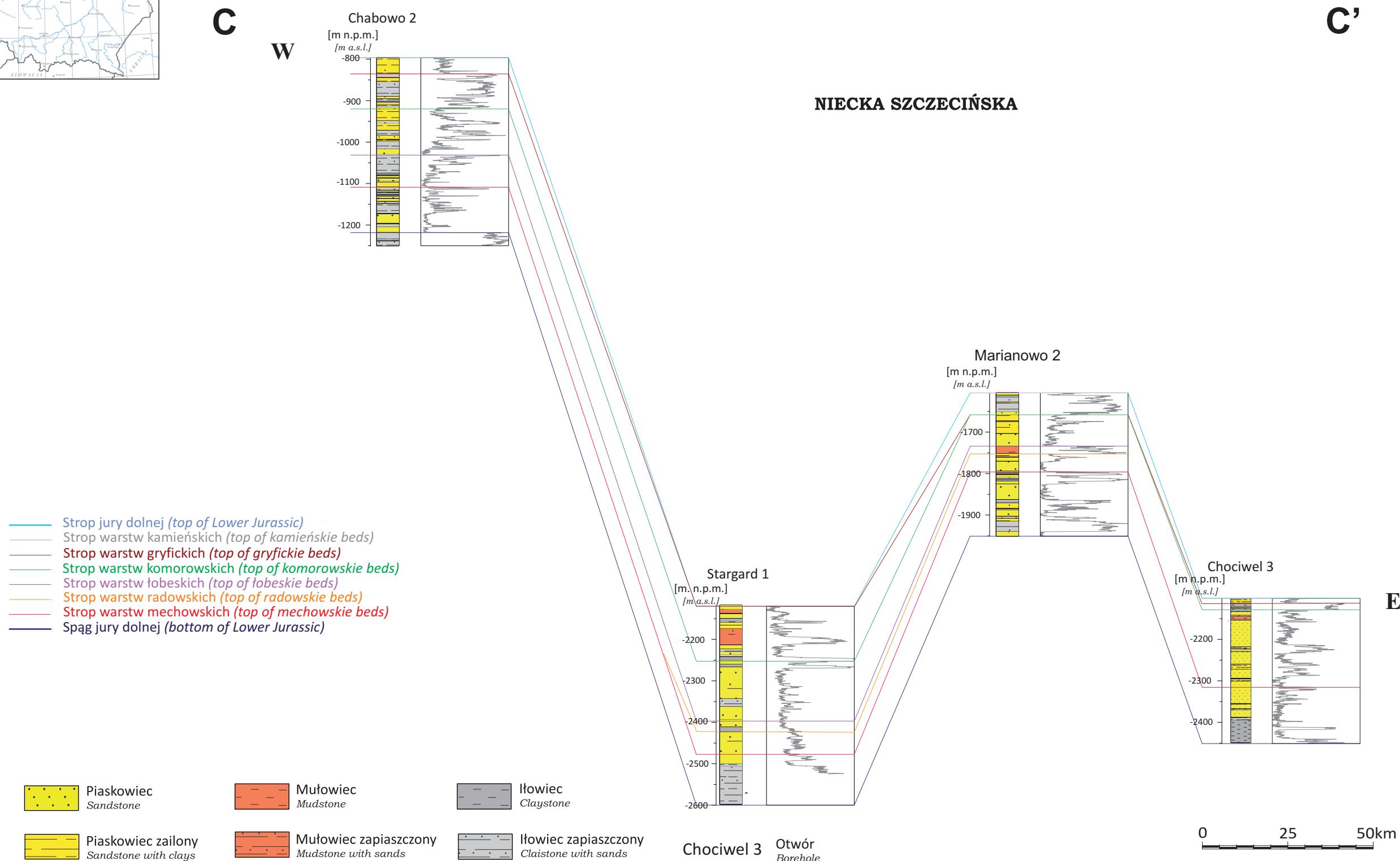




# KORELACJA LITOSTRATYGRAFICZNA UTWORÓW JURY DOLNEJ C-C' (przebieg na zał. 4.2.10)

Zał. 4.2.11  
Encl. 4.2.11

**LITHOSTRATIGRAPHIC CORRELATION BETWEEN LOWER JURASSIC FORMATIONS C-C'**  
(line at encl. 4.2.10)



MAPA STRUKTURALNA STROPU  
UTWORÓW JURY DOLNEJ  
(CENTRALNA CZĘŚĆ NIECKI  
SZCZECIŃSKIEJ)

Encl. 4.2.12

STRUCTURAL MAP OF THE TOP  
OF THE LOWER JURASSIC  
FORMATIONS (CENTRAL PART  
OF THE SZCZECIN TROUGH)

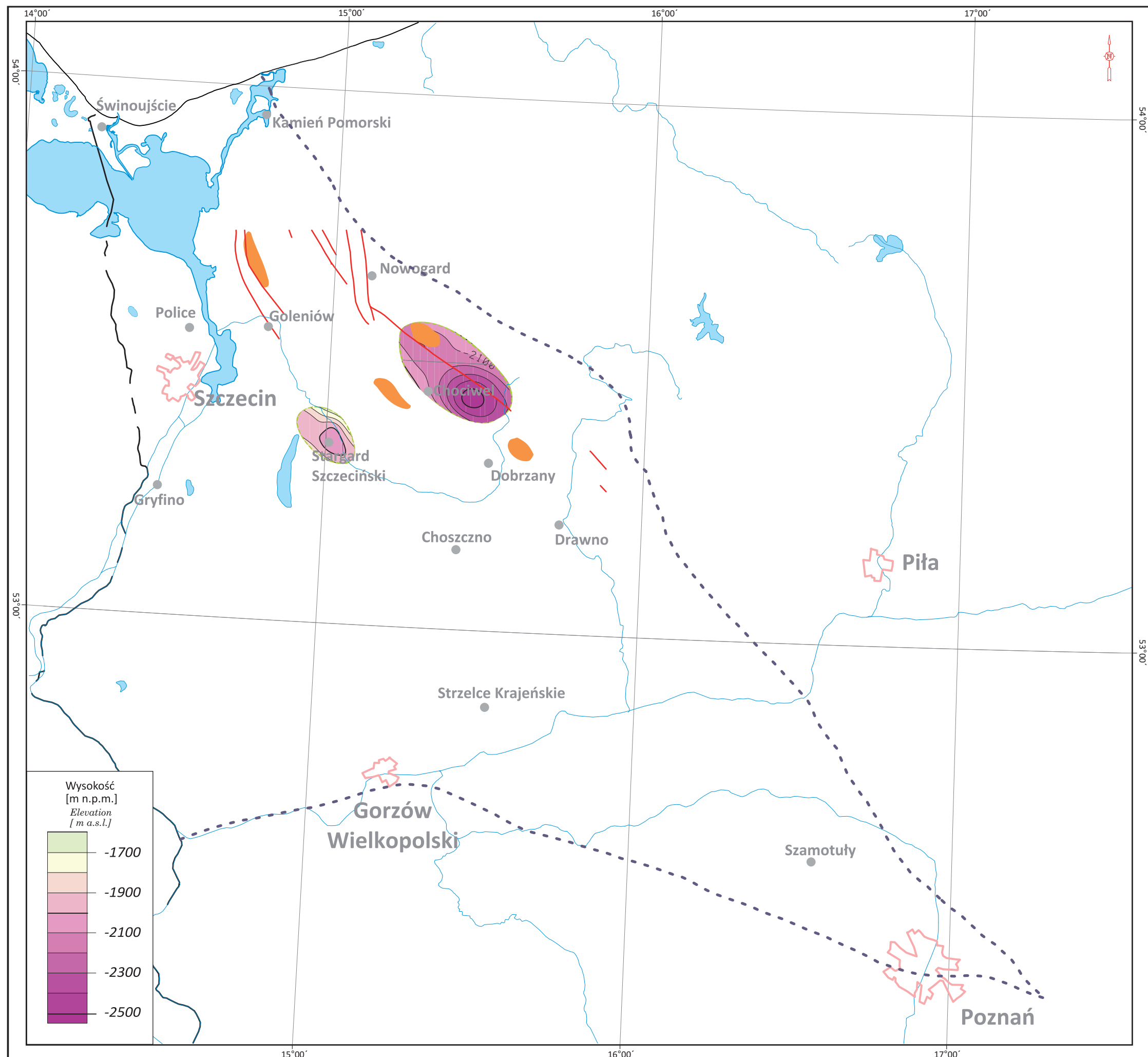
\*na podstawie: Sowiżdżał, 2012  
(based on Sowiżdżał, 2012)

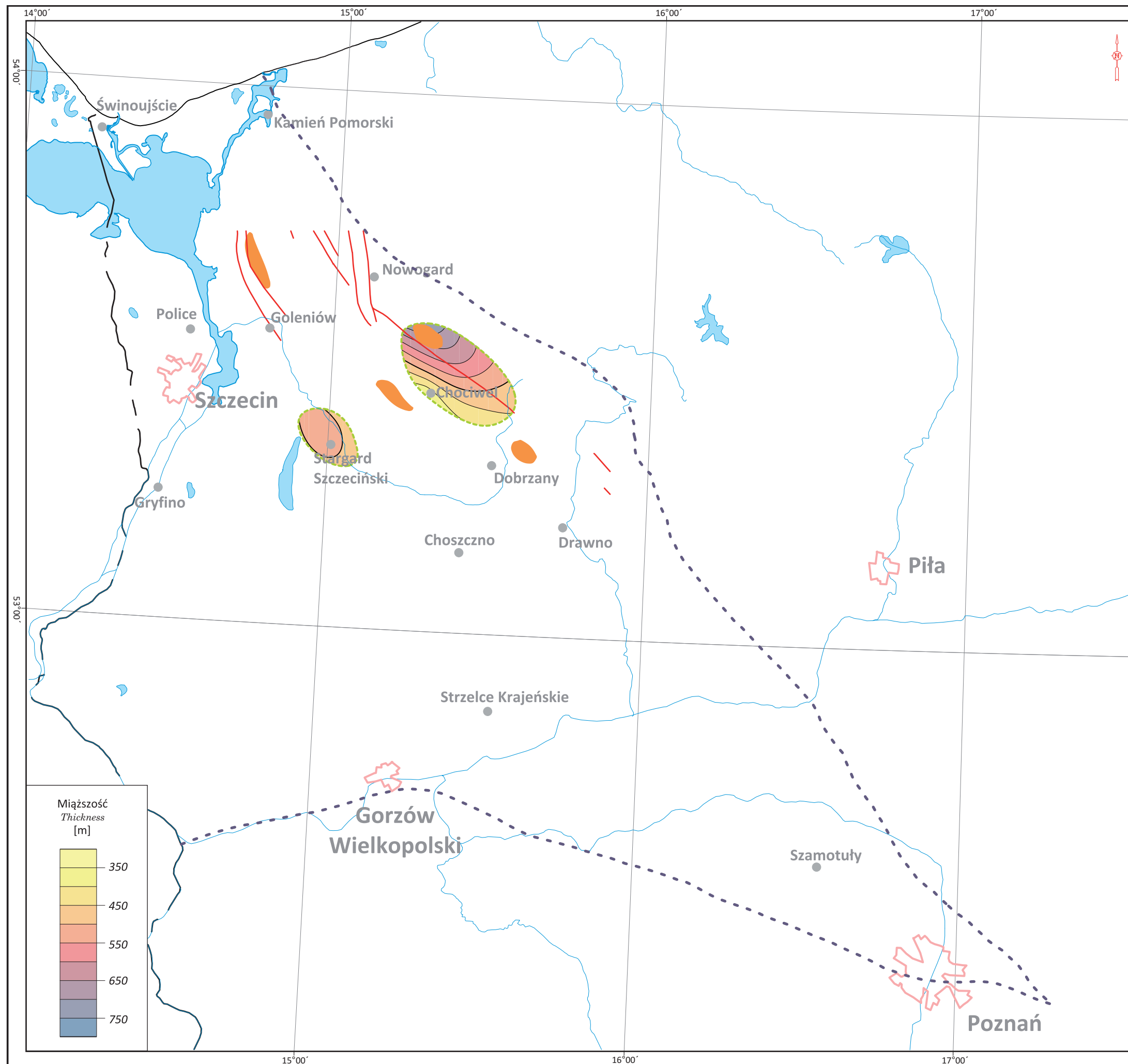
LEGENDA:

LEGEND:

-  Ważniejsze miasta  
Main cities
-  Chociwel  
Miejscowości  
Cities
-  Izohipsy stropu utworów  
jury dolnej [m n.p.m.]  
Isohyps of the top of Lower Jurassic formation  
[m a.s.l.]
-  Struktury solne  
Salt structures
-  Uskoki  
Faults
-  Izoterma 90°C w spągu jury dolnej  
Isotherm 90°C in the bottom of Lower Jurassic
-  Granica niecki szczecińskiej  
Boundary of the Szczecin Trough
-  Rzeki  
Rivers
-  Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
-  Granica państwa  
National border
-  Linia brzegowa  
Shoreline

0 25 50 km





**Załącznik 4.2.13**

**MAPA MIĄŻSZOŚCI CAŁKOWITEJ  
UTWORÓW JURY DOLNEJ  
(CENTRALNA CZĘŚĆ NIECKI  
SZCZECIŃSKIEJ)\***

**Encl. 4.2.13**

**MAP OF TOTAL THICKNESS  
OF THE LOWER JURASSIC  
FORMATION (CENTRAL PART  
OF THE SZCZECIN TROUGH)**

\*na podstawie: Sowiżdżał, 2012  
(based on Sowiżdżał, 2012)

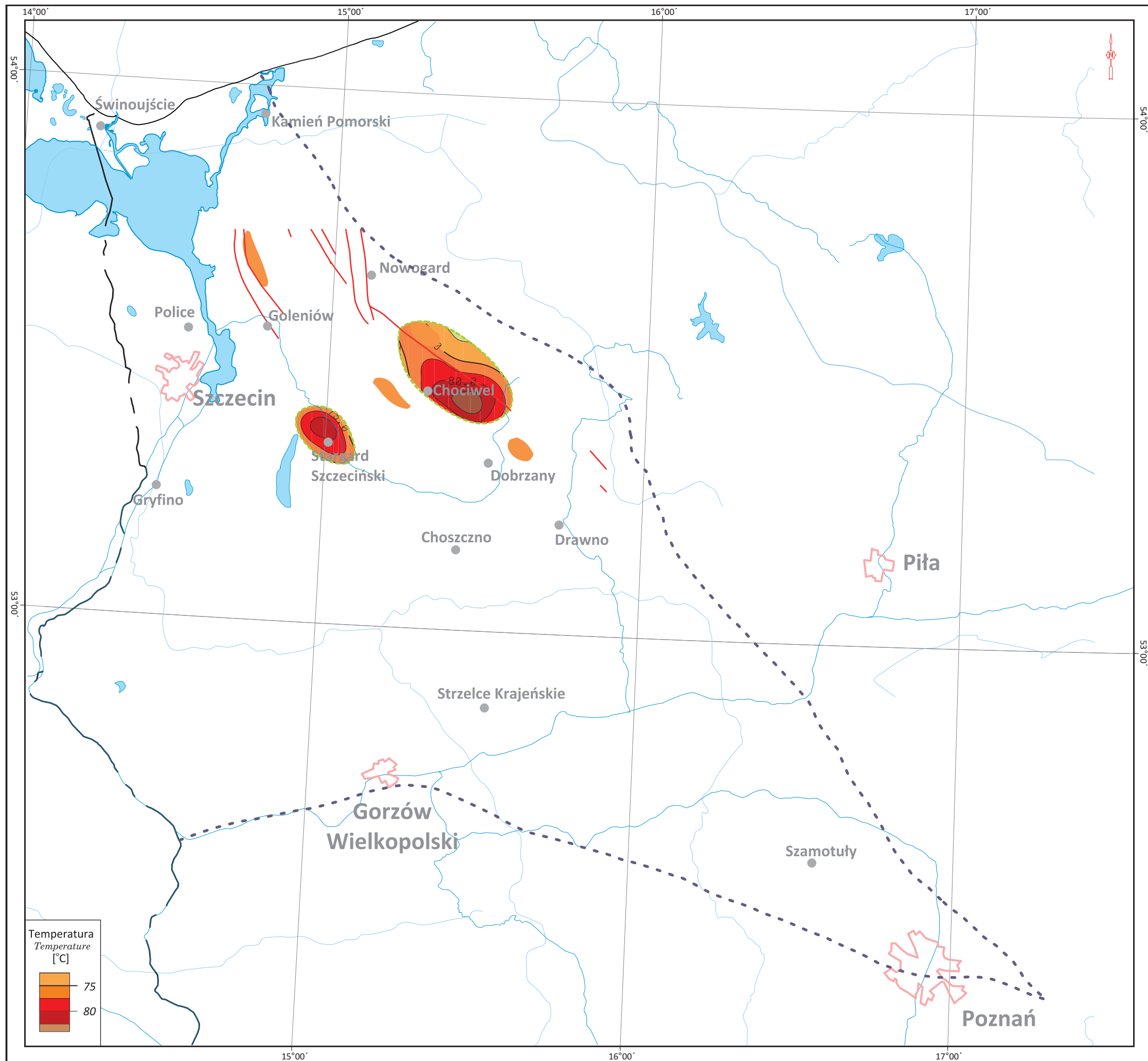
**LEGENDA:**

**LEGEND:**

- Ważniejsze miasta  
Main cities
- Chociwel  
Miejscowości  
Cities
- Struktury solne  
Salt structures
- Uskoki  
Faults
- Izopachyty utworów jury dolnej [m]  
Isopachytes of Lower Jurassic formation [m]
- Izoterma 90°C w spągu jury dolnej  
Isotherm 90°C in the bottom of Lower Jurassic
- Granica niecki szczecińskiej  
Boundary of the Szczecin Trough
- Rzeki  
Rivers
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
- Granica państwa  
National border
- Linia brzegowa  
Shoreline

0 25 50 km





**Załącznik 4.2.14**

**MAPA TEMPERATURY W STROPIE  
UTWORÓW JURY DOLNEJ  
(CENTRALNA CZĘŚĆ NIECKI  
SZCZECIŃSKIEJ)\***

**Encl. 4.2.14**

**MAP OF TEMPERATURE  
IN THE TOP OF THE  
LOWER JURASSIC  
FORMATION (CENTRAL PART OF  
THE SZCZECIN TROUGH)**

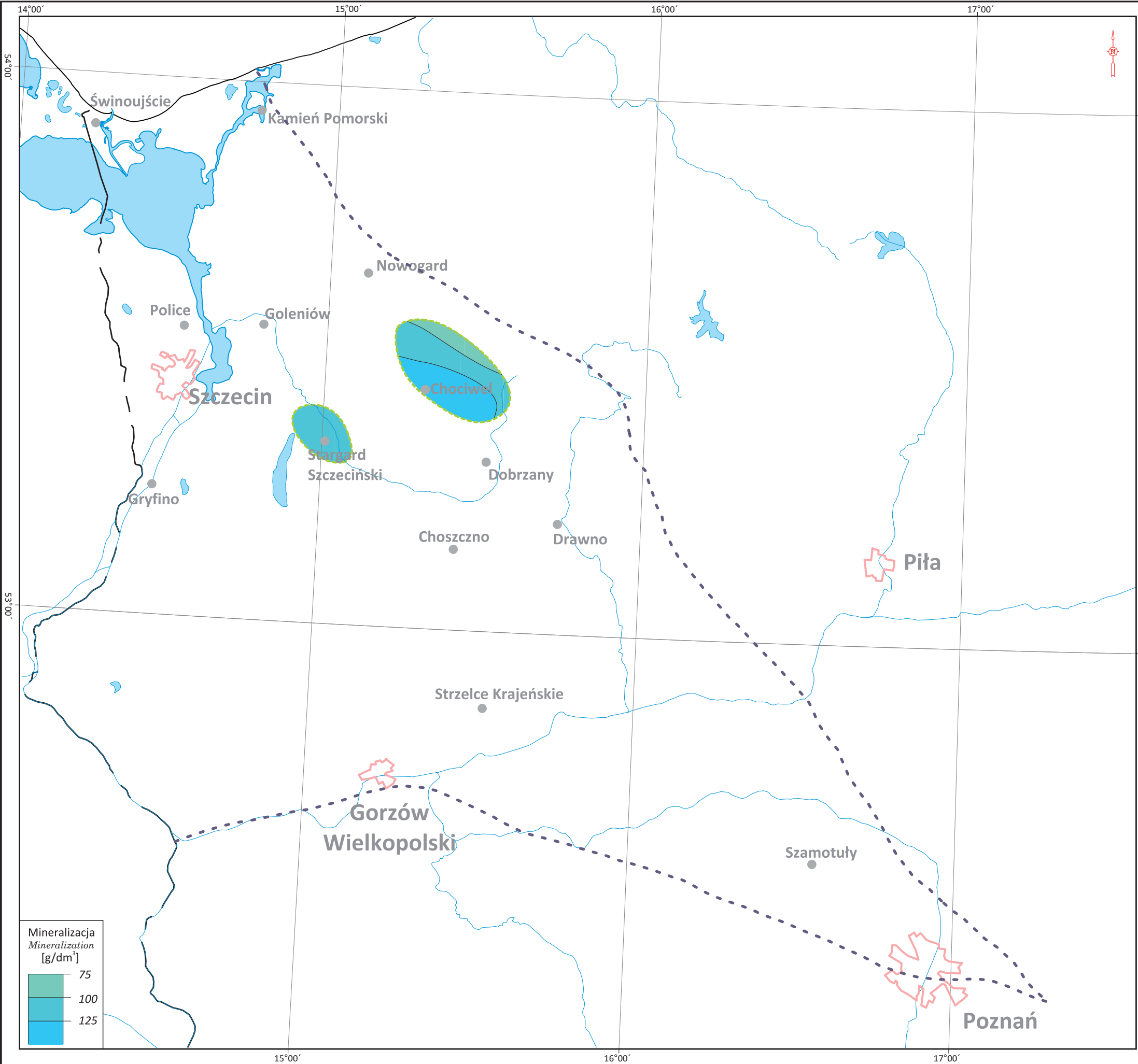
\*na podstawie: Sowiżdżał, 2012  
(based on Sowiżdżał, 2012)

**LEGENDA:**

**LEGEND:**

-  Ważniejsze miasta  
Main cities
-  Chociwel  
Miejscowości  
Cities
-  Izotermy stropu utworów jury dolnej [°C]  
Isotherms at the top of Lower Jurassic [°C]
-  Izoterma 90°C w spągu jury dolnej  
Isotherm 90°C in the bottom of Lower Jurassic
-  Granica niecki szczecińskiej  
Boundary of the Szczecin Trough
-  Rzeki  
Rivers
-  Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
-  Granica państwa  
National border
-  Linia brzegowa  
Shoreline

0 25 50 km



**Załącznik 4.2.15**

**MAPA MINERALIZACJI WODY  
W STROPIE UTWORÓW  
JURY DOLNEJ  
(CENTRALNA CZĘŚĆ NIECKI  
SZCZECIŃSKIEJ)\***

**Encl. 4.2.15**

**MAP OF WATER  
MINERALIZATION IN THE  
TOP OF THE LOWER JURASSIC  
FORMATION (CENTRAL PART OF  
THE SZCZECIN TROUGH)**

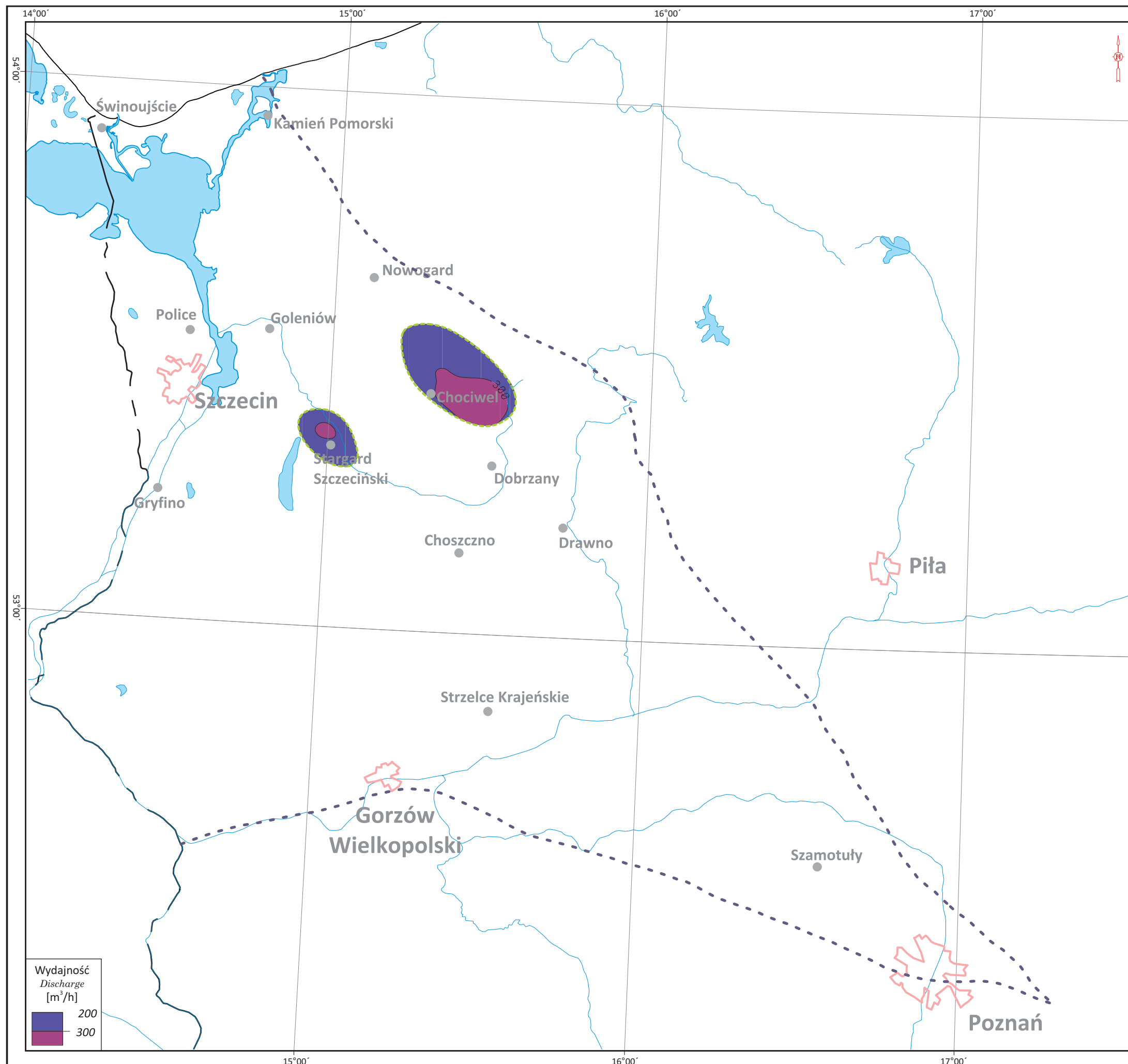
\*na podstawie: Sowizdżał, 2012  
(based on Sowizdżał, 2012)

**LEGENDA:**  
*LEGEND:*

- Ważniejsze miasta  
*Main cities*
- Chociwel  
Pozostałe miejscowości  
*Other cities*
- Izolinie mineralizacji [g/dm³]  
*Isolines of TDS [g/dm³]*
- Izoterma 90°C w spągu jury dolnej  
*Isotherm 90°C in the bottom of Lower Jurassic*
- Granica niecki szczecińskiej  
*Boundary of the Szczecin Trough*
- Rzeki  
*Rivers*
- Zbiorniki wodne  
*Water reservoirs*
- Granica państwa  
*National border*
- Linia brzegowa  
*Shoreline*

0 25 50 km

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ



**Zał. 4.2.16**

**MAPA WYDAJNOŚCI POTENCJALNEJ  
OTWORÓW WIERTNICZYCH  
W UTWORACH JURY DOLNEJ  
(CENTRALNA CZĘŚĆ NIECKI  
SZCZECIŃSKIEJ)\***

**Encl. 4.2.16**

**MAP OF POTENTIAL DISCHARGE  
OF BOREHOLES  
IN THE LOWER JURASSIC  
FORMATION (CENTRAL PART  
OF THE SZCZECIN TROUGH)**

\*na podstawie: Sowizdzał, 2012  
(based on Sowizdzał, 2012)

**LEGENDA:**

**LEGEND:**

- Ważniejsze miasta  
Main cities
- Pozostałe miejscowości  
Other cities
- Izolinie wydajności [m³/h]  
Isolines of discharge [m³/h]
- Izoterma 90°C w spągu jury dolnej  
Isotherm 90°C in the bottom of Lower Jurassic
- Granica niecki szczecińskiej  
Boundary of the Szczecin Trough
- Rzeki  
Rivers
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
- Granica państwa  
National border
- Linia brzegowa  
Shoreline

0 25 50 km





Załącznik 4.2.17

MAPA LOKALIZACJI  
OTWORÓW WIERTNICZYCH  
DLA ZBIORNIKA TRIASU DOLNEGO

Encl. 4.2.17

MAP OF BOREHOLE LOCATIONS  
FOR THE LOWER  
TRIASSIC RESERVOIR

LEGENDA:

LEGEND:

- Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
- Uniejów 1** Otwory, których stwierdzono występowanie piaskowców  
Boreholes with sandstones occurrence
- Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
- Obszar o temp. ponad 120°C w stropie triasu dolnego  
The area with the temp. over 120°C in the top of the Lower Triassic
- Walcuski Jednostki strukturalne  
Structural units
- Linia przekroju korelacyjnego (załącznik 4.2.19 i 4.2.20)  
Line of correlative cross-section (encl. 4.2.19 and 4.2.20)
- Rzeki  
Rivers
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
- Granica państwa  
National border

0 25 50 km

LOKALIZACJA OBSZARU  
PERSPEKTYWICZNEGO  
DLA ZBIORNIKA TRIASU DOLNEGO  
NA TLE PODZIAŁU  
ADMINISTRACYJNEGO POLSKI

Encl. 4.2.18

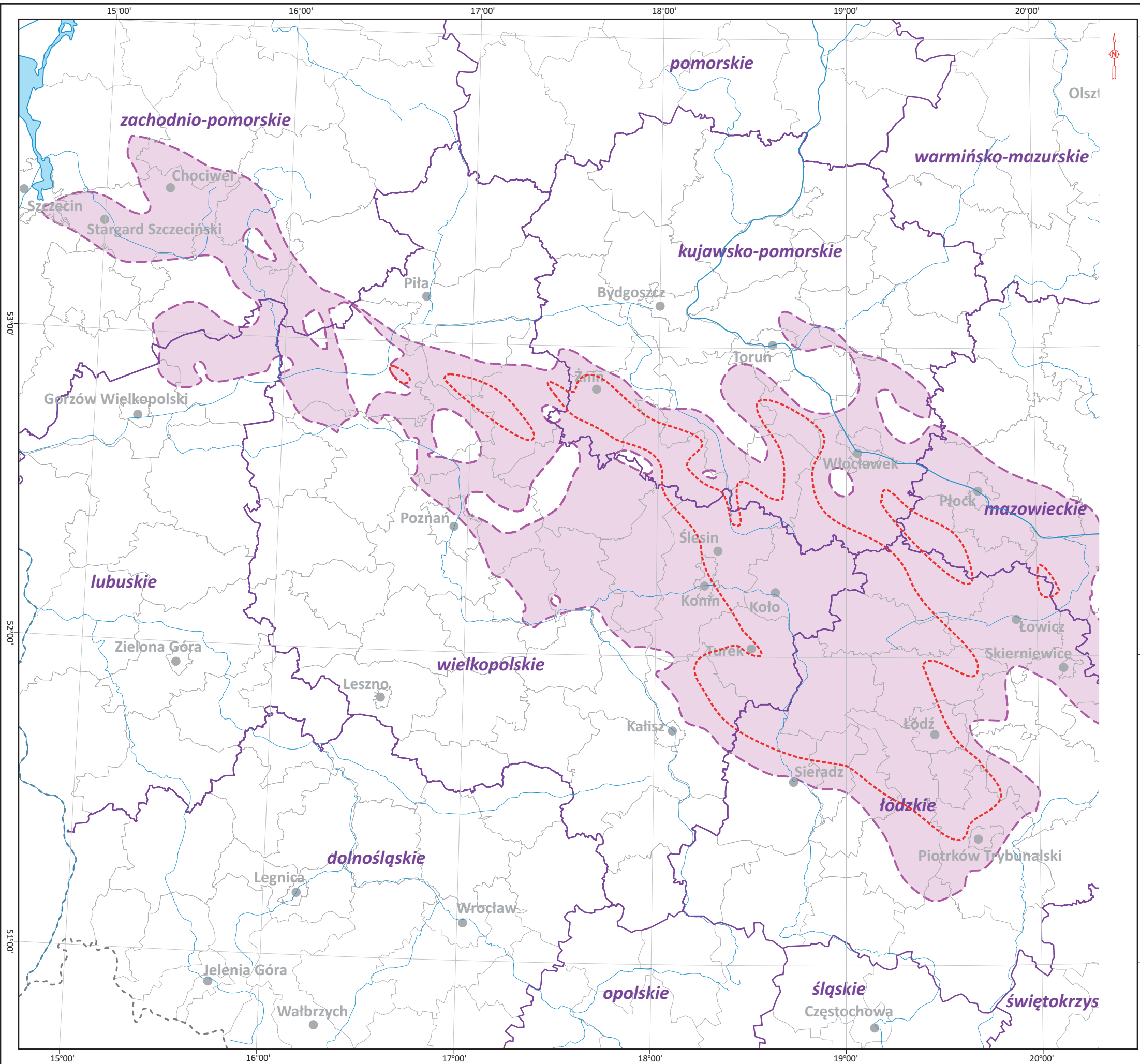
MAP OF LOCATION OF THE  
PERSPECTIVE AREA FOR THE  
LOWER TRIASSIC RESERVOIR  
IN RELATION TO POLISH  
ADMINISTRATIVE BOUNDARIES

LEGENDA:

LEGEND:

-  **Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
-  Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
-  Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie triasu dolnego  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Triassic
-  Granica województwa  
Border of voivodeship
-  Granica powiatu  
Border of county
-  Rzeki  
Rivers
-  Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
-  Granica państwa  
National border

0 25 50 km





# PRZEKRÓJ KORELACYJNY D-D' (przekrój na zał. 4.2.17)

CROSS-SECTIONAL CORRELATION D-D'  
(line at encl. 4.2.17)

Zał. 4.2.19

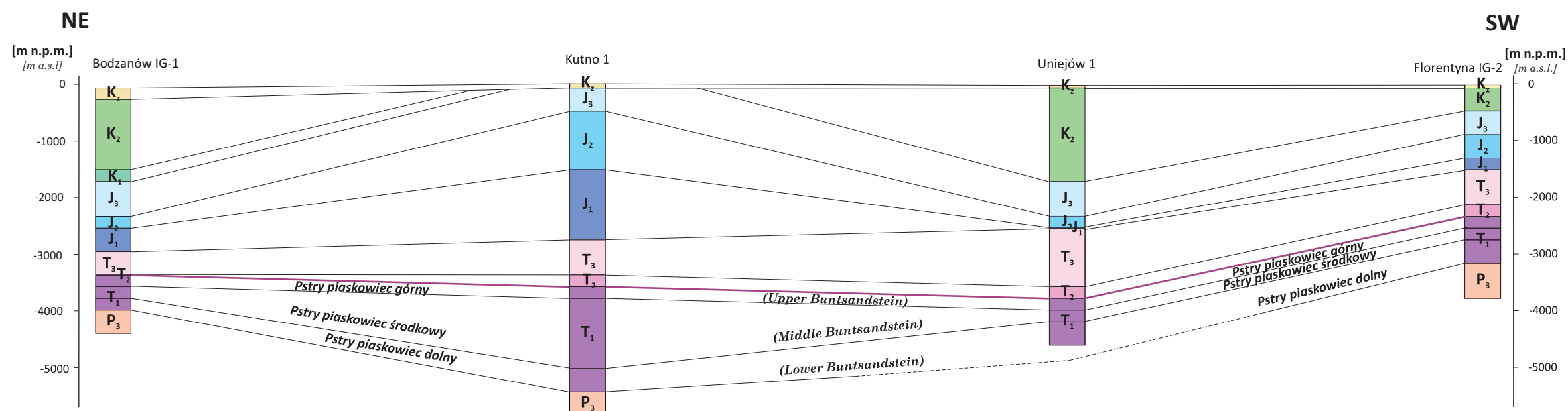
Encl. 4.2.19

D

NIECKA WARSZAWSKA

D'

NIECKA MOGILEŃSKO-ŁÓDZKA



K<sub>2</sub> Kenozoik  
Cenozoic

K<sub>2</sub> Kreda górna  
Upper Cretaceous

J<sub>3</sub> Jura górna  
Upper Jurassic

T<sub>3</sub> Trias górny  
Upper Triassic

P<sub>3</sub> Perm górny  
Upper Permian

K<sub>1</sub> Kreda dolna  
Lower Cretaceous

J<sub>2</sub> Jura środkowa  
Middle Jurassic

T<sub>2</sub> Trias środkowy  
Middle Triassic

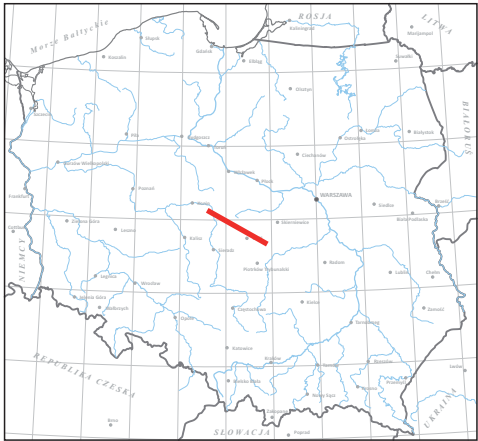
Uniejów 1 Otwór  
Borehole

J<sub>1</sub> Jura dolna  
Lower Jurassic

T<sub>1</sub> Trias dolny  
Lower Triassic

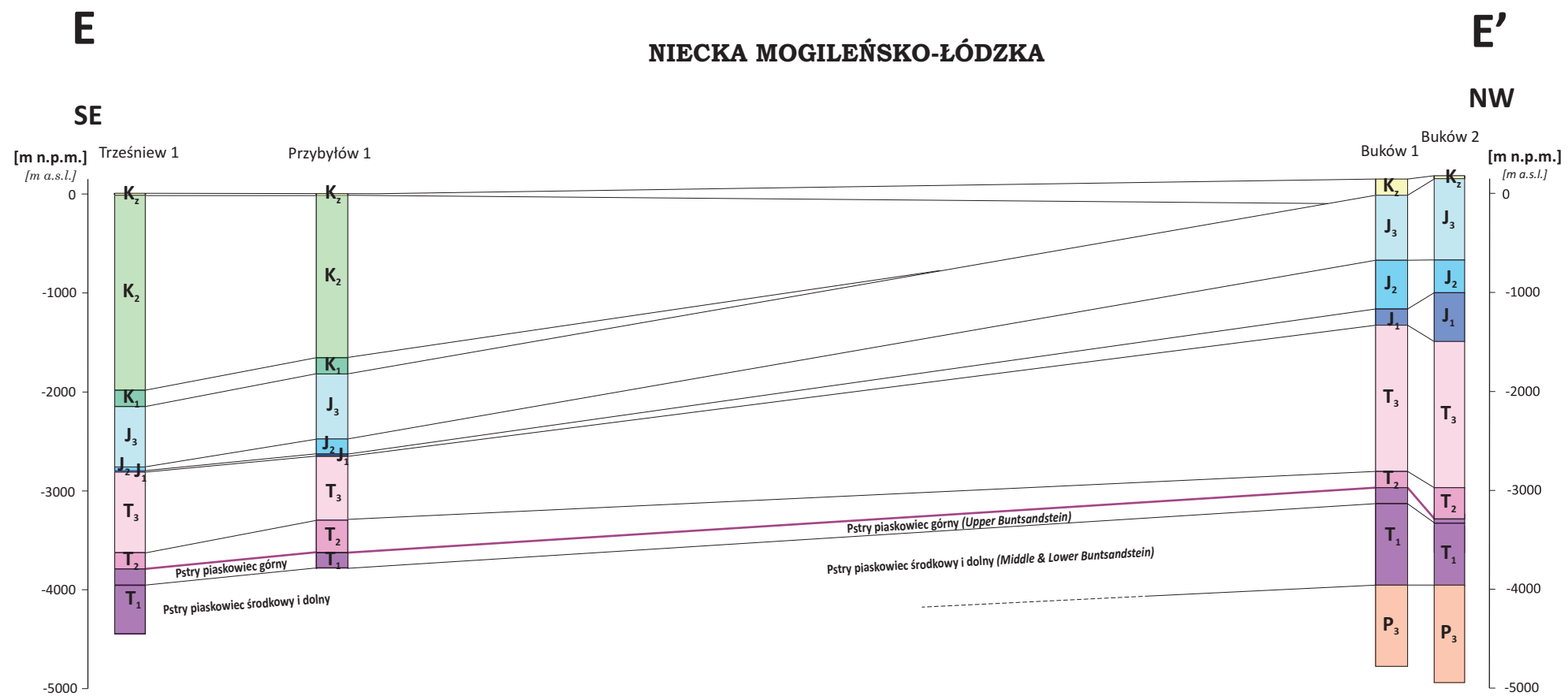
0 10 20 km



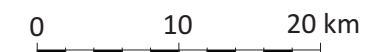


**PRZEKRÓJ KORELACYJNY E-E'**  
**(przekrój na zał. 4.2.17)**  
**CROSS-SECTIONAL CORRELATION E-E'**  
**(line at encl. 4.2.17)**

**Zał. 4.2.20**  
**Encl. 4.2.20**



|                      |                      |                      |                                 |                      |                                  |                      |                                   |                      |                             |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| <b>K<sub>2</sub></b> | Kenozoik<br>Cenozoic | <b>K<sub>3</sub></b> | Kreda górna<br>Upper Cretaceous | <b>J<sub>3</sub></b> | Jura górna<br>Upper Jurassic     | <b>T<sub>3</sub></b> | Trias górny<br>Upper Triassic     | <b>P<sub>3</sub></b> | Perm górny<br>Upper Permian |
|                      |                      | <b>K<sub>1</sub></b> | Kreda dolna<br>Lower Cretaceous | <b>J<sub>2</sub></b> | Jura środkowa<br>Middle Jurassic | <b>T<sub>2</sub></b> | Trias środkowy<br>Middle Triassic | Buków 1              | Otwór<br>Borehole           |
|                      |                      |                      |                                 | <b>J<sub>1</sub></b> | Jura dolna<br>Lower Jurassic     | <b>T<sub>1</sub></b> | Trias dolny<br>Lower Triassic     |                      |                             |



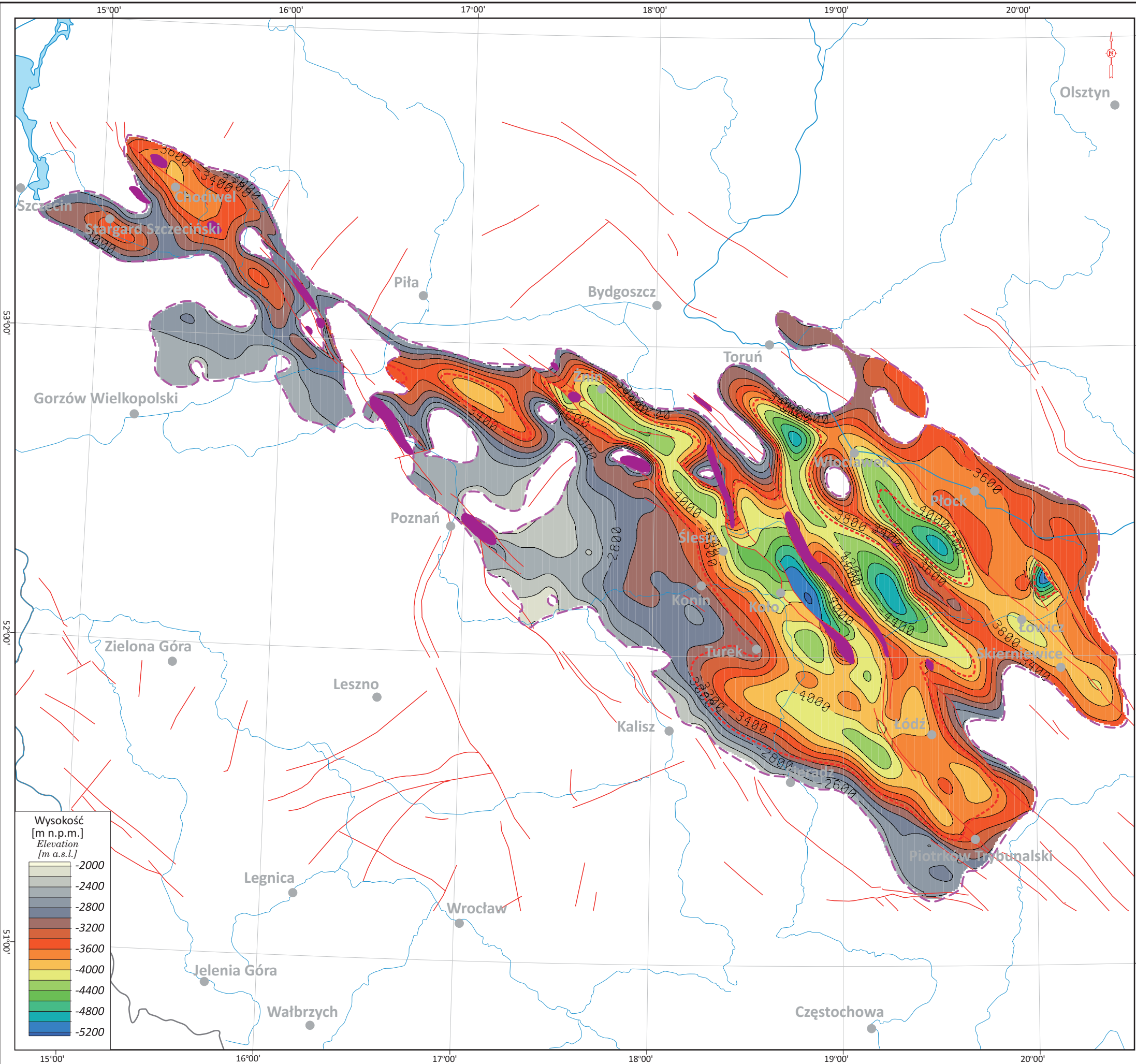
MAPA STRUKTURALNA  
STROPU UTWORÓW  
TRIASU DOLNEGO\*

STRUCTURAL MAP  
OF THE TOP OF THE  
LOWER TRIASSIC FORMATIONS

\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:  
LEGEND:

- Płock** Ważniejsze miasta  
Main cities
  - Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
  - Uskoki  
Faults
  - Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie triasu dolnego  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Triassic
  - Struktury solne  
Salt structures
  - Izohipsy stropu utworów  
triasu dolnego [m n.p.m.]  
Isohypes of the top of Lower  
Triassic formation [m a.s.l.]
  - Rzeki  
Rivers
  - Granica państwa  
National border
  - Zbiorniki wodne  
Water reservoirs
- 0 25 50 km



Załącznik 4.2.22

MAPA MIĄŻSZOŚCI CAŁKOWITEJ  
UTWORÓW TRIASU DOLNEGO\*

Encl. 4.2.22

MAP OF TOTAL THICKNESS  
OF THE LOWER TRIASSIC  
FORMATION

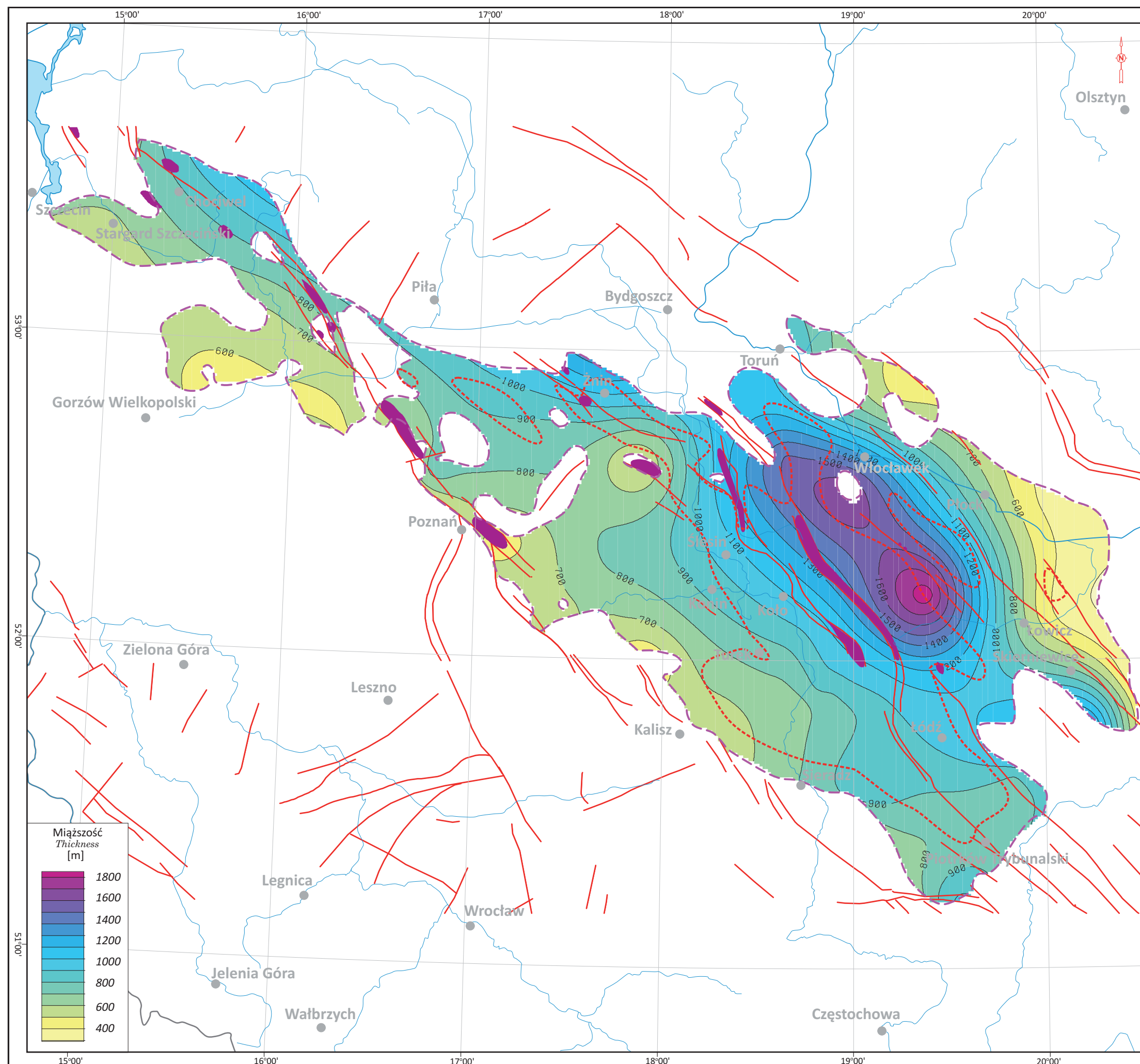
\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:

LEGEND:

- Płock Ważniejsze miasta  
Main cities
- Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
- Uskoki  
Faults
- Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie triasu dolnego  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Triassic
- Struktury solne  
Salt structures
- Izopachyty utworów triasu dolnego [m]  
Isopachytes of Lower Triassic formation [m]
- Rzeki  
Rivers
- Granica państwa  
National border
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs

0 25 50 km





MAPA TEMPERATURY  
W STROPIE UTWORÓW  
TRIASU DOLNEGO\*

MAP OF TEMPERATURE  
IN THE TOP OF THE  
LOWER TRIASSIC FORMATION

\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

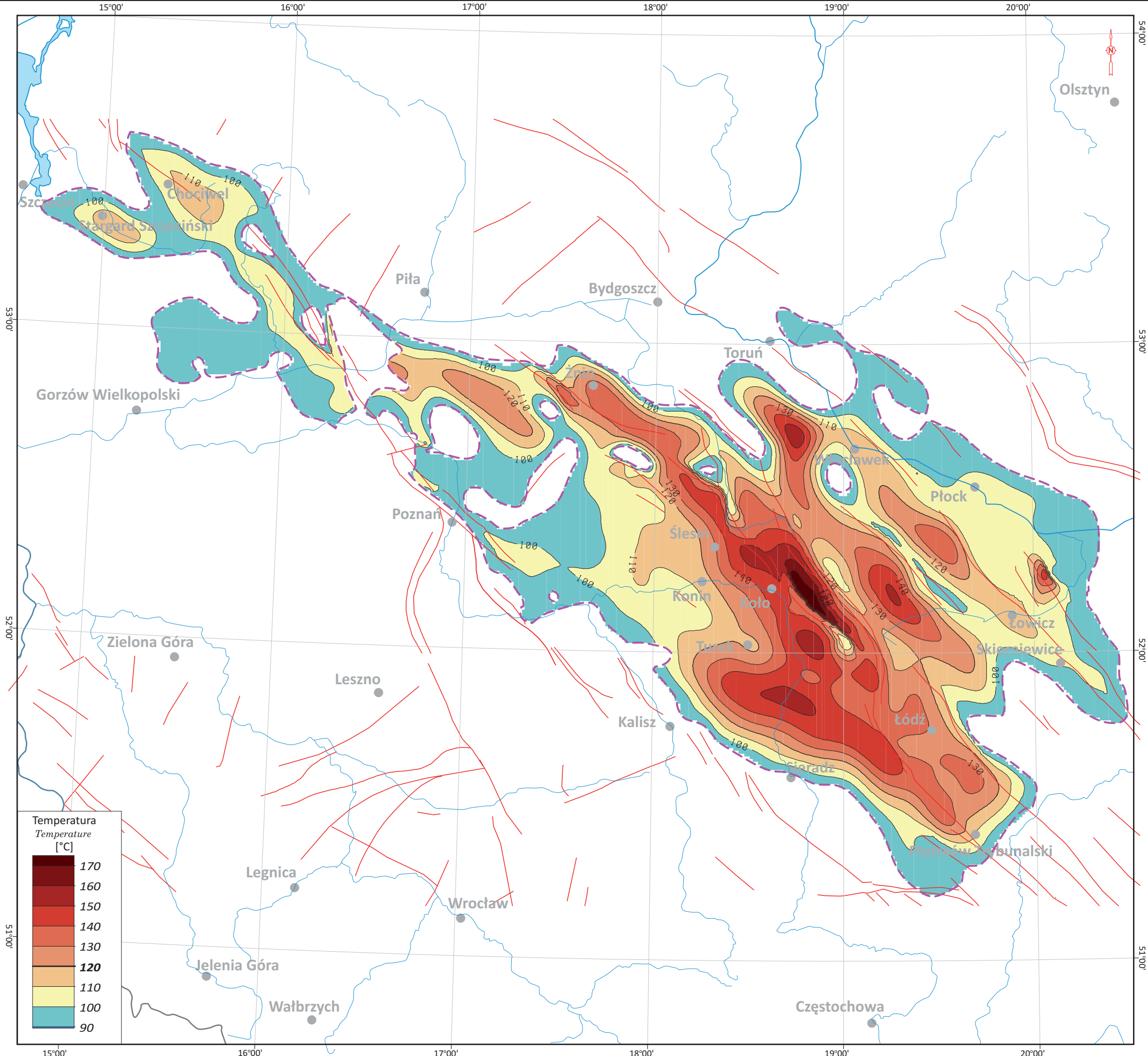
LEGENDA:  
LEGEND:

- Płock Ważniejsze miasta  
Main cities
- Uskoki  
Faults
- Granica obszaru perspektywicznego  
Boundary of the perspective area
- Izotermy stropu utworów  
triasu dolnego [°C]  
Isotherms at the top of Lower Triassic  
formation [°C]
- Rzeki  
Rivers
- Granica państwa  
National border
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs

0 25 50 km



WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ



Zał. 4.2.24

MAPA MINERALIZACJI WODY  
W STROPIE UTWORÓW  
TRIASU DOLNEGO\*

Encl. 4.2.24

MAP OF WATER MINERALIZATION  
IN THE TOP OF THE  
LOWER TRIASSIC FORMATION

\*na podstawie: Górecki (red.), 2006  
(based on Górecki (ed.), 2006)

LEGENDA:

LEGEND:

- Płock Ważniejsze miasta  
Main cities
- Granica obszaru perspektywnego  
Boundary of the perspective area
- Obszar o temp. ponad 120°C  
w stropie dolnego triasu  
The area with the temp. over 120°C  
in the top of the Lower Triassic
- 50 Izolinie mineralizacji [g/dm³]  
Isolines of TDS [g/dm³]
- Rzeki  
Rivers
- Granica państwa  
National border
- Zbiorniki wodne  
Water reservoirs

0 25 50 km



WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE  
PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

