

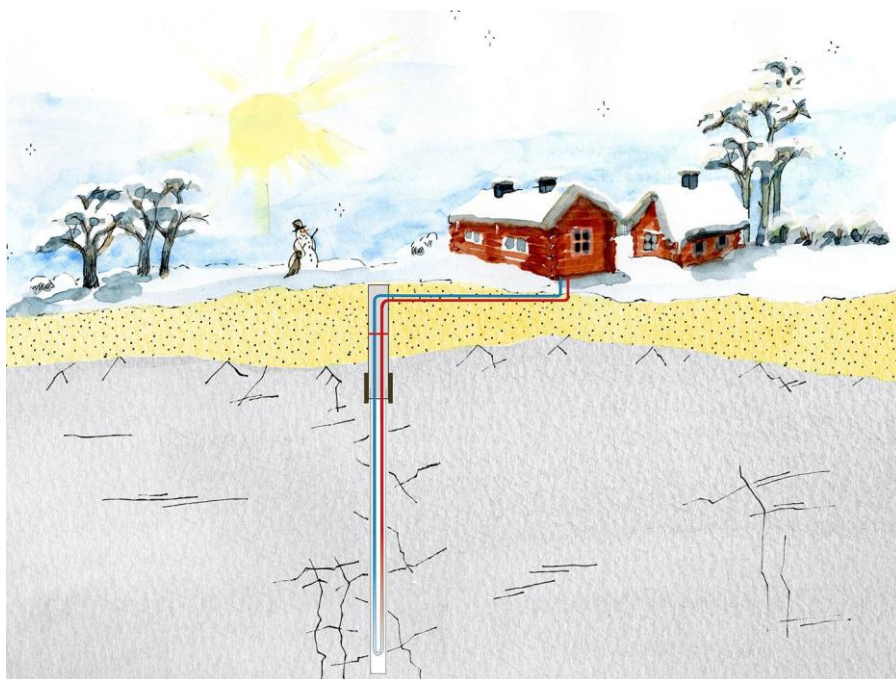
Geoenergetyka

# Informacje geologiczne dotyczące instalacji geoenergetycznych - Podsumowanie

Wrzesień 2016

Mikael Erlström, Claes Mellqvist, Gerhard Schwarz,  
Mattias Gustafsson & Peter Dahlqvist

Raport SGU 2016:16



# SGU

Sveriges geologiska undersökning  
Geological Survey of Sweden

Okładka: Przykładowy system geotermalny (grzewczy)  
dla pojedynczego gospodarstwa domowego.  
Ilustracja: Anna Jonson, ArtAnna.

Szwedzka Służba Geologiczna, SGU  
Box 670, 75128 Uppsala  
tel: 018-179000  
fax: 018-179210  
E-mail: [sgu@sgu.se](mailto:sgu@sgu.se)  
[www.sgu.se](http://www.sgu.se)

Raport pt.

***Geoenergi. Geologisk information för geoenergianläggningar – en översikt***  
***Geoenergetyka. Informacje geologiczne dotyczące instalacji geoenergetycznych -***  
***Podsumowanie***

Został wykonany przez Szwedzką Służbę Geologiczną (Sveriges geologiska undersökning, SGU) w roku 2016. Został on przetłumaczony z oryginału w języku szwedzkim na język polski w ramach realizacji projektu Geothermal4PL, na podstawie umowy licencyjnej z dnia 6.07.2017 ze Szwedzką Służbą Geologiczną z siedzibą w Uppsali. Tłumaczenie wykonała firma Lingua Lab z Krakowa, natomiast specjalistyczną korektę techniczną wykonali członkowie zespołu projektowego: Maja Kowalska i Maciej Kłonowski oraz Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła.

Raport stanowi aktualny i najobszerniejszy opis dobrych praktyk stosowanych przy wykonawstwie płytkich systemów geotermalnych w Szwecji oraz innych krajach nordyckich, w tym w Norwegii. Udostępnienie podręcznika w języku polskim przyczyni się do ujednolicenia standardów i poprawy jakości usług w branży płytkiej geotermii w Polsce.

Raport nie stanowi zbioru obowiązujących przepisów prawa w Polsce, a Partnerzy projektu Geothermal4PL nie ponoszą żadnej odpowiedzialności prawnej w przypadku stosowania zawartych w nim treści w praktyce.

Raport udostępniony jest wszystkim interesariuszom projektu Geothermal4PL w wersji z dnia 27.11.2017. Wszelkie uwagi co do treści raportu prosimy zgłaszać do zespołu projektu drogą e-mailową, pod adresem: [geothermal4pl@pgi.gov.pl](mailto:geothermal4pl@pgi.gov.pl).

Warszawa, 27.11.2017



MINISTERSTWO  
ŚRODOWISKA



## **Geothermal4PL**

### ***Wsparcie zrównoważonego rozwoju i wykorzystania płytkiej energii geotermalnej na terenie obszarów objętych programem Mieszkanie Plus w Polsce***

*Support for sustainable development and use of shallow geothermal energy  
within the areas of the Mieszkanie Plus Programme in Poland*

Beneficiary / Beneficiaries: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

Partner Norwegian / Norwegian Partner: Christian Michelsen Research AS

Projekt Geothermal4PL, nr umowy 102/2017/Wn50/OA-XN-04/D, jest finansowany z Mechanizmu Finansowego EOG 2009-2014 w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej (FWD), Program PL04 "Oszczędzanie energii i promowanie odnawialnych źródeł energii".

Project Geothermal4PL, contract no 102/2017/Wn50/OA-XN-04/D, is financed by the EEA Financial Mechanism 2009-2014 within the framework of the Bilateral Cooperation Fund (BCF), Programme PL04 "Energy saving and promotion of renewable sources of energy".

Operatorami Programu w Polsce są Ministerstwo Środowiska i Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

The operators of the Programme in Poland are Ministry of Environment and National Fund for Environmental Protection and Water Management.

Warszawa, 27.11.2017

## **WSTĘP**

Szwedzka Służba Geologiczna, SGU, ma przyczyniać się do trwałego rozwoju społecznego, korzystając ze swojej specjalistycznej wiedzy oraz przypisanej roli.

Wizja Urzędu dotycząca zrównoważonego społeczeństwa, to dobre zarządzanie zasobami naturalnymi. Pozyskiwanie energii powinno odbywać się w dużym stopniu

z odnawialnych źródeł energii, a dostęp do wody pitnej powinien być zapewniony. SGU aktywnie działa w celu zwiększenia wiedzy na temat znaczenia warunków geologicznych w zakresie zrównoważonego rozwoju.

Zwiększenie stopnia wykorzystywania odnawialnych źródeł energii jest warunkiem koniecznym do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla w Szwecji i spełnienia celów klimatycznych. Przyczyniamy się do tego między innymi poprzez stworzenie warunków do pozyskiwania energii geotermalnej w sposób zrównoważony. Oznacza to między innymi, że pobieranie energii geotermalnej odbywa się w takich miejscach, i w taki sposób, żeby nie wpływało negatywnie na wody podziemne i całe środowisko.

W niniejszym raporcie, który jest zaktualizowaną wersją poprzedniego wydania z 2015 roku, przekazujemy wiedzę, która będzie przydatna zarówno dla władz i przemysłu geotermalnego, a także dla wielu osób, które mają lub będą budować instalacje geotermalne.

Uppsala, 01 września 2016

**Anna Hedenström**  
Kierownik działu

# Spis treści

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>WSTĘP.....</b>                                                                  | <b>3</b>  |
| <b>Podsumowanie.....</b>                                                           | <b>7</b>  |
| <b>English summary .....</b>                                                       | <b>7</b>  |
| <b>Wprowadzenie i kontekst .....</b>                                               | <b>7</b>  |
| <b>RÓŻNE RODZAJE INSTALACJI.....</b>                                               | <b>10</b> |
| Płytki geotermia (niskotemperaturowa) .....                                        | 10        |
| Otworowe wymienniki ciepła.....                                                    | 10        |
| Płytki geotermia (poziome kolektory gruntowe).....                                 | 11        |
| Geotermia średnotemperaturowa - wody podziemne .....                               | 10        |
| Warstwy wodonośne .....                                                            | 10        |
| Energia cieplna w jeziorach .....                                                  | 11        |
| Geotermia średnio- i wysokotemperaturowa.....                                      | 12        |
| Rodzaje studni głębinowych .....                                                   | 13        |
| Technologia wiercenia .....                                                        | 14        |
| <b>PRZYKŁADOWE INFORMACJE Z SGU.....</b>                                           | <b>14</b> |
| Podłoże skalne .....                                                               | 15        |
| Struktura i właściwości podłoża skalnego .....                                     | 15        |
| Skład skał mineralogicznych.....                                                   | 18        |
| Parametry fizyczne.....                                                            | 18        |
| Pomiary i analiza właściwości termicznych .....                                    | 23        |
| Warstwy gruntu .....                                                               | 26        |
| Termalne właściwości warstw gruntu .....                                           | 27        |
| Miąższość warstwy gruntu .....                                                     | 27        |
| <b>Woda podziemna .....</b>                                                        | <b>29</b> |
| Archiwum studni.....                                                               | 31        |
| Mapy hydrogeologiczne.....                                                         | 32        |
| Obszary ochronne wód .....                                                         | 32        |
| Zanieczyszczony grunt.....                                                         | 33        |
| <b>WPŁYW GEOLOGICZNYCH I GEOGRAFICZNYCH CZYNNIKÓW NA SYSTEMY GEOTERMALNE .....</b> | <b>34</b> |
| Przewodnictwo cieplne .....                                                        | 34        |
| Oddziaływania termiczne.....                                                       | 35        |
| <b>Przykłady przetwarzanych informacji przez SGU .....</b>                         | <b>40</b> |
| <b>Mapy przewodzenia ciepła- Rodzaje skał.....</b>                                 | <b>40</b> |
| Mapa przewodnictwa cieplnego dla Sztokholmu .....                                  | 40        |
| Mapa geotermalna dla Skanii .....                                                  | 40        |
| <b>Ocena mapy przewodności cieplnej .....</b>                                      | <b>42</b> |
| <b>Model głębokości podłoża gruntowego w Skanii.....</b>                           | <b>45</b> |
| Wygenerowany komputerowo model głębokości podłoża gruntowego .....                 | 45        |
| Stworzony ręcznie model głębokości podłoża gruntowego .....                        | 45        |
| <b>Ocena modelu głębokości podłoża gruntowego .....</b>                            | <b>45</b> |
| <b>Wiercenie geotermalne w podłożu skalnym w Skanii .....</b>                      | <b>49</b> |
| <b>DYSKUSJA .....</b>                                                              | <b>51</b> |
| <b>PODZIĘKOWANIA .....</b>                                                         | <b>53</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                                          | <b>54</b> |

## Podsumowanie

Raport zawiera podsumowanie różnych rodzajów informacji, które mogą być wykorzystywane do oceny warunków energii geotermalnej w Szwecji. Celem raportu jest ogólne przedstawienie informacji dostarczanych przez SGU. Raport zawiera także propozycje projektów zwiększających wiedzę na temat wpływu instalacji geotermalnych na wody podziemne.

W odpowiedzi na zwiększoną liczbę zapytań, które SGU otrzymuje od agencji rządowych, stowarzyszeń branżowych i publicznych, opisano możliwości i problemy związane z energetyką geotermalną. Zaobserwowano zwiększone zapotrzebowanie na wytyczne do oceny projektów, pozwoleń, oceny wpływu na środowisko (np. oddziaływań na wody podziemne, oddziaływań termicznych, zanieczyszczeń) w zakresie energii geotermalnej (w głównej mierze geotermii niskotemperaturowej). Raport może być uznany jako częściowe sprawozdanie z bieżących prac prowadzonych przez SGU. Materiał przedstawiony w raporcie może być postrzegany jako podstawowy dokument przy współpracy z innymi agencjami i organizacjami, a także jako zestawienie odpowiedzi na szereg pytań dotyczących energii geotermalnej.

Według SGU istnieje potrzeba utworzenia skoordynowanej, krajowej jednostki odpowiedzialnej za wydawanie zezwoleń i nadzór, która mogłaby wydawać wytyczne i wskazówki w zakresie geotermii niskotemperaturowej.

## English summary

This report provides an overview of different types of geological information relevant to the assessment of the conditions for shallow geothermal energy in Sweden. The aim is to present an overall picture of the type of information that SGU can provide. The report also proposes various research and development projects that are needed to increase knowledge about, for example, thermal effects and how the groundwater is affected.

The opportunities and problems concerning geothermal energy as highlighted in the report are derived from the increased number of inquiries that SGU receives from other agencies, industry associations and the public. Generally, these issues demonstrate a great need for advice and guidance on the assessment of design, permits, supervision, and environmental hazards (for example groundwater, thermal effects, pollution). This report may be seen as a further step in working on these issues. The documentation presented can also be seen as a basis for cooperation with other agencies and organizations to answer these questions.

SGU believes there is a need for a coordinated function that is authorized to convey advice and guidance on various issues related to shallow geothermal energy.

## Wprowadzenie i kontekst

Pojęcie geoenergetyki w Szwecji zwykle kojarzy się z wykorzystaniem energii zgromadzonej w gruncie, skałach i wodach podziemnych oraz okresowym magazynowaniem nadmiaru ciepła lub zimna w górnej części skorupy ziemskiej. W górnej części skorupy ziemskiej, do głębokości około dziesięciu metrów, zmiany temperatury w gruncie są w znacznej mierze zależne od promieniowania słonecznego (np. Eskilson 1987, Fetter 2001). W środowisku miejskim, budynki przyczyniają się do ocieplenia płytkich warstw gruntu (Henning & Limberg 2012). Poniżej tego poziomu, temperatura w podłożu rośnie wraz ze wzrostem głębokości, głównie w zależności od gradientu geotermicznego (np. Signorelli 2004 Banki 2008). Kiedy energia jest pozyskiwana z głębokości większej niż 400m, używa się pojęcia geotermia średnio- lub wysokotemperaturowa zamiast geotermii płytkiej (niskotemperaturowej) (przyp. tłum. W Szwecji są to pojęcia „sv: geoenergi” [pl: geoenergetyka] – do 400m, oraz „sv: geotermi” [pl: geotermia] – poniżej 400m). Energetyka geotermalna w Szwecji ma największy potencjał w porowatych i przepuszczalnych skałach osadowych, głównie piaskowcach.

Szwecja jest położona na skałach prekambryjskich, z grubą skorupą ziemską. Gradient geotermalny nie jest tak samo wysoki, jak w krajach o odmiennych warunkach geologicznych (na przykład na obszarach o cienkiej skorupie ziemskiej lub podłożu wulkanicznym).

W Szwecji temperatura w gruncie zmienia się do głębokości kilkudziesięciu metrów, zwykle w zakresie od 3°C do 10°C. Poniżej tego poziomu następuje wzrost temperatury o 15-30°C/km. Gradient temperatury jest nieznacznie większy w skałach osadowych niż w skałach prekambryjskich. W celu osiągnięcia temperatury odpowiedniej do pozyskiwania energii, tj. wyższej niż 120°C, wymagane są w Szwecji odwierty o głębokości 6-7 km. Odwierty o takiej głębokości wiążą się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi oraz dużą niepewnością, związaną z ruchem oraz ilością wód podziemnych. Energetyka geotermalna stosowana jest do celów grzewczych tylko w Lund (Skania). Potencjał istnieje również na innych obszarach, gdzie występują głębokie pęknięcia lub środowiska wodonośne, takie jak strefy uskoków i piaskowca, z wodą podziemną o temperaturze 20-70 stopni. Systemy geotermalne są zazwyczaj przystosowane do ogrzewania na dużą skalę (systemy ciepłownicze lub obiekty przemysłowe). Oznacza to, że w odróżnieniu od płytkiej geotermii, energetyka geotermalna ogranicza się do obszarów, w których powyższe warunki występują jednocześnie.

W Szwecji pojęcie geoenergetyki odnosi się do technik, które wykorzystują podłoże skalne, warstwy gruntu lub jeziora do pozyskiwania i magazynowania energii. W kontekście międzynarodowym, pojęcie geoenergetyki może także obejmować paliwa kopalne. Energimyndigheten (przyp. tłum. Urząd ds. Energii Elektrycznej) podało w 2007 roku, że ciepło z powierzchni gruntu, skał i wód podziemnych należy do grupy odnawialnych źródeł energii. Odnawialne źródła energii kojarzone są zazwyczaj z energią wodną, wiatrową, słoneczną i bioenergią. Poświęca się stosunkowo mało uwagi geoenergetyce jako równie ważnemu źródłu energii.

Od końca XX wieku, Szwecja stała się europejskim liderem w zakresie technologii pomp ciepła i liczby instalacji płytkiej geotermii. Wiele organizacji, w tym Geotec, szacuje potencjał geoenergetyki na bardzo wysoki. Geotec, we współpracy z szeregiem ekspertów, przedstawiło obszerny raport dotyczący geoenergetyki, jej udziału w pozyskiwaniu energii oraz warunków panujących w Szwecji. Raport uwzględnia między innymi statystyki dotyczące liczby instalacji, emisji dwutlenku węgla, zużycia energii etc. (Bath i inni 2012).

Według SGU istnieje zapotrzebowanie na ogólnodostępną wiedzę dla lepszej oceny warunków do rozbudowy instalacji geoenergetycznych z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju. Geoenergetyka była dotychczas postrzegana jako substytut ogrzewania paliwami kopalnymi lub energią elektryczną. Jednak w dłuższej perspektywie, efekty dalszego rozwoju powinny zostać sprecyzowane. Połączenie geoenergetyki z tak zwaną zieloną energią elektryczną jest przykładem idealnego scenariusza, opisanego między innymi w dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej, dotyczącej stosowania energii z odnawialnych źródeł (EG 2009/28).

Energetyka geotermalna nie przyczynia się na chwilę obecną do produkcji energii elektrycznej w Szwecji, ponieważ stosuje się systemy niskotemperaturowe. Nawet jeśli w instalacjach geoenergetycznych nie produkuje się energii elektrycznej, geoenergetyka zastępuje bezpośrednie zużycie energii elektrycznej – ogrzewanie. Na naszej szerokości geograficznej, ogrzewanie stanowi dużą część zapotrzebowania energetycznego, co sprawia, że geoenergetyka (geotermia niskotemperaturowa) jest dobrą formą pozyskiwania energii. Ponadto, energia geotermalna niskotemperaturowa nie jest ograniczona geograficznie ani geologicznie, ponieważ odpowiednie warunki występują w całym kraju. Możliwość wykorzystania tej formy energii zależy od szeregu czynników, które w dużej mierze są zależne od lokalnych warunków geologicznych, zabudowań, infrastruktury oraz obszarów chronionych (ochrona wód, ochrona środowiska naturalnego etc.).

W Szwecji istnieje obecnie duża liczba instalacji geotermalnych niskotemperaturowych. Dokładna liczba instalacji jest nieznana, ale szacuje się, że jest to ponad pół miliona instalacji. W celu osiągnięcia celów klimatycznych UE, zakładających zmniejszoną emisję gazów cieplarnianych o połowę w latach 1990 - 2050, konieczne jest zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii. SGU uważa, że energetyka geotermalna niskotemperaturowa może być istotnym elementem, ale należy pamiętać o dalszym, zrównoważonym rozwoju, zwłaszcza w odniesieniu do interakcji z innymi interesami społecznymi (takimi jak budowle podziemne czy



eksploatacja wód podziemnych). Warunkiem zrównoważonego rozwoju jest zaprojektowanie instalacji geotermalnych niskotemperaturowych w taki sposób, żeby funkcja termiczna została zachowana. Ważną składową jest między innymi znajomość warunków geologicznych (dane o stratygrafii, miąższości gruntu), warunków wód gruntowych i struktury podłoża skalnego.

W odpowiedzi na pytania dotyczące energetyki geotermalnej, SGU rozpoczęła pracę w celu opracowania i dostarczenia informacji geologicznych w zakresie instalacji geotermalnych w Szwecji. Praca ta obejmuje opracowywanie wytycznych do wiercenia (Normbrunn), krajowego modelu miąższości gruntu, informacji na temat właściwości termicznych w podłożu skalnym, a także udostępnianie informacji dla użytkowników korzystających z interaktywnej mapy oraz usług mobilnych.

Czasami zachodzi konflikt między instalacjami geotermalnymi a innymi interesami, jak na przykład ochrona ważnych zasobów wód podziemnych. Oprócz korzyści dla środowiska związanych z wykorzystaniem energii geotermalnej, może ona w niektórych przypadkach wpływać na jakość wody lub zależności pomiędzy różnymi warstwami wodonośnymi. Zmiany ciśnienia, zmiany w jakości wody i połączenia różnych zasobów, a także efekty termiczne to tylko niektóre z czynników, które należy uwzględnić przy projektowaniu instalacji geotermii niskotemperaturowej. Często pojawia się pytanie dotyczące ponownego wypełnienia i uszczelnienia odwiertów. Ponadto, wymagana jest wiedza i odpowiednia metodologia dla termicznej oceny podłoża skalnego (np. wyznaczenie głębokości odwiertu dla uzyskania optymalnego efektu). Oszacowanie oddziaływania termicznego może okazać się trudne w przypadku osadowych warstw skalnych składających się z kilku różnych rodzajów skał o różnych właściwościach termicznych i fizycznych. Porowatość, przepływ wód podziemnych i mineralogia wpływa na zdolność do wydobywania i składowania energii w podłożu skalnym.

Aby móc odpowiedzieć na wiele pytań, wymagana jest nie tylko wiedza na temat warunków geologicznych, ale również znajomość rozwiązań technicznych. Praca SGU w zakresie energii geotermalnej koncentruje się na zdobywaniu wiedzy i informacji potrzebnych do odpowiedzi na pytania o podłożu skalnym i wodach podziemnych, dla oceny warunków do instalacji geotermalnej niskotemperaturowej. Branże geotermalne mają największą wiedzę techniczną, aby odpowiedzieć na pytania dotyczące projektowania i rozwiązań technologicznych, na podstawie panujących warunków geologicznych.

W projektowaniu systemów geotermalnych dla indywidualnych gospodarstw domowych zazwyczaj stosuje się znormalizowane założenia projektowe, a przy większych zakładach tak zwane pomiary TRT (*Thermal Response Test*) w celu oceny reakcji odwiertu na zmiany temperatury (Gehlin 1998, 2002).

Niniejszy raport zawiera przegląd informacji geologicznych, które mogą być wykorzystywane jako pomoc w wyjaśnieniu niektórych kwestii poruszonych powyżej. Raport prezentuje m.in. badania pilotażowe termicznych właściwości skał w południowej Szwecji, gdzie przeprowadzenie ich było możliwe ze względu na złożoną strukturę geologiczną oraz dużą dostępność danych. W raporcie brano także pod uwagę wyniki z projektu FoU, finansowanego przez SGU, na temat przewodności cieplnej w rejonie Sztokholmu (Schwarz i inni 2010) oraz informacje na temat termicznych właściwości skał (Sundberg i inni 1985). Kolejny projekt badawczy finansowany przez SGU ma na celu uaktualnienie informacji o polu temperatury na większej głębokości, parametrach cieplnych szwedzkiego podłoża skalnego oraz zwiększenie wiedzy o geotermii niskiej entalpii w Szwecji.

Raport przedstawia również udział SGU w europejskiej sieci projektów Suburban ([www.nagcity.com](http://www.nagcity.com)). Suburban to czteroletni projekt, który rozpoczął się w 2013 roku i ma na celu przekazywanie wyników badań geologicznych z różnych krajów, w zakresie geologii miejskiej, wód podziemnych i geotermii (Bonsor, et al. 2015). Ogólnym celem jest stworzenie „*Best Practice*” dla wielu z tych zagadnień. Suburban jest finansowany przez COST (*Europe Cooperation in Science and Technology*).

Pytania dotyczące geotermii, wymagań środowiskowych, ochrony wód podziemnych oraz możliwości wykonywania odwiertów są coraz częściej zadawane przez gminy, urzędy,

wykonawców i osoby prywatne. SGU uważa, że istnieje zapotrzebowanie na wytyczne i doradztwo, a także większe kompetencje urzędów oceniających ryzyko. SGU uważa również, że istnieje potrzeba wymiany wiedzy i komunikacji między agencjami rządowymi, organizacjami branżowymi, wykonawcami i użytkownikami, aby lepiej zrozumieć aspekty energii geotermalnej, rozwiązania technologiczne i dostępne systemy. Umożliwia to władzom uzyskanie kompleksowej wiedzy, niezbędnej do obiektywnej odpowiedzi na wiele z kwestii poruszonych w sprawozdaniu, a także sprawia, że instalacje geotermalne mogą być rozwijane w sposób zrównoważony.

## **RÓŻNE RODZAJE INSTALACJI**

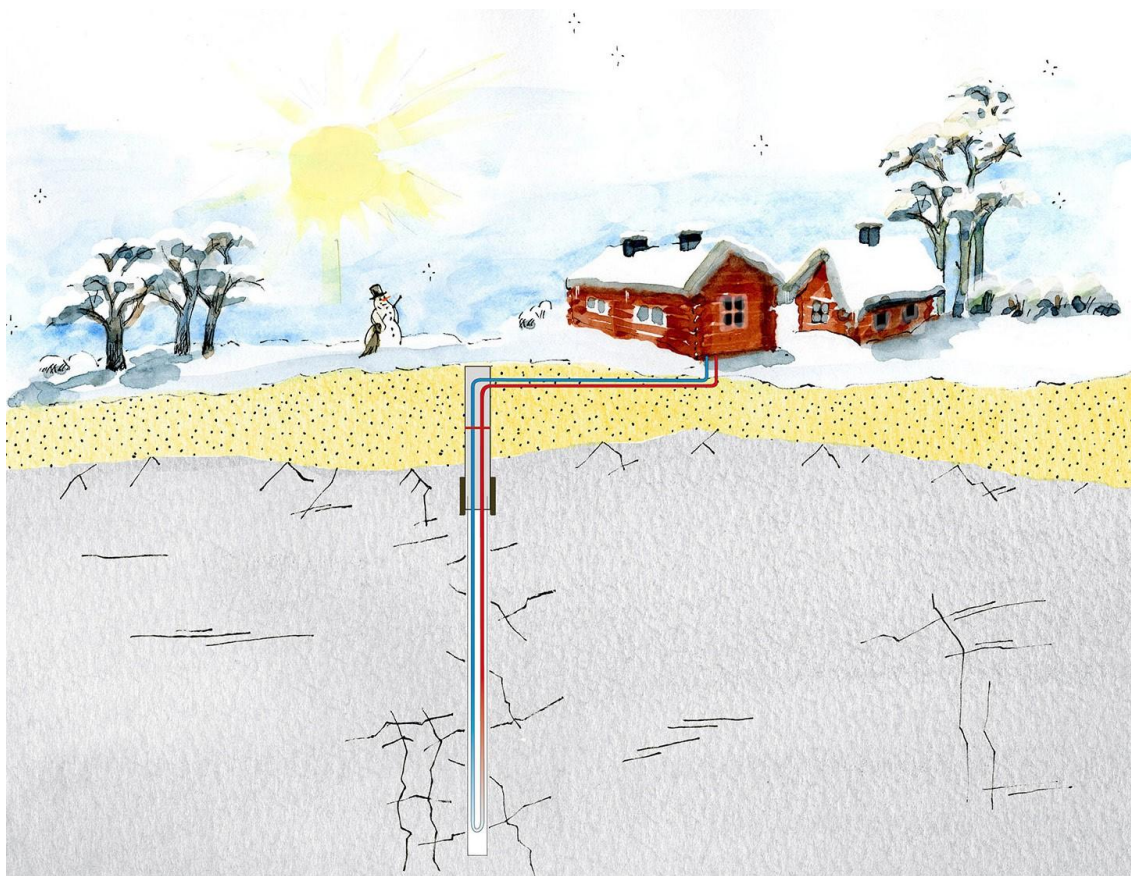
### ***Płytką geotermia (niskotemperaturowa)***

Płytką, niskotemperaturową geotermia jest najbardziej popularną formą energetyki termalnej w Szwecji. Jest stosowana przede wszystkim do ogrzewania domów jednorodzinnych i częściowo także większych budynków mieszkalnych (rys. 1). Odwierty geotermalne mają zazwyczaj średnicę pomiędzy 115 a 165 mm. W odwiertach montuje się pionowe kolektory, które działają jak wymienniki ciepła. Głębokość odwiertu wynosi zazwyczaj 100-300m w zależności od żądanego poboru energii oraz warunków geologicznych i geograficznych, z tendencją do głębszych otworów. Mediana głębokości otworu według archiwum otworów SGU wynosi 175m. W kolektorze krąży ciecz nośnika ciepła, najczęściej bioetanol lub woda. Część energii w cieczy poddaje się ekstrakcji za pomocą pompy ciepłej. Stosunkowo niska temperatura wody ze skał zostaje zwiększona do temperatury użytkowej w budynku. System jest pasywny i zamknięty. Ta sama ciecz nośnika ciepła jest używana przez cały czas, co znacznie ułatwia konserwację. Zazwyczaj odwierty znajdują się w odległości około 20 m od siebie, w celu zmniejszenia oddziaływań termalnych pomiędzy nimi. W przypadku, gdy nie ma wystarczającej ilości miejsca, można wykonać głębsze odwierty lub wykonać je pod kątem. System jest pasywny, co oznacza, że pobiera energię tylko z gruntu.

System może być stosowany zarówno do pasywnego ogrzewania jak i chłodzenia. Gdy jest on stosowany do pobierania energii cieplnej, obszar wokół odwiertów jest chłodzony, co daje możliwość wykorzystania systemu do pasywnego chłodzenia budynku. Z punktu widzenia mocy całego systemu, dąży się do równowagi między poborem a oddawaniem ciepła. Ponieważ systemy są zazwyczaj projektowane do eksploatacji w przeciągu niecałych 6 miesięcy w roku, ładowanie odbywa się podczas drugiej połowy roku. Wielkość i moc ładowania zależą od bieżącego gradientu temperatury w skale i od przenikalności cieplnej skał. Ładowanie odbywa się w sposób ciągły od dołu i boków. Latem, ładowanie w górnej części gruntu odbywa się za pomocą energii słonecznej. Claesson & Eskilson (1987) szacują, że udział energii słonecznej w płytkiej energii geotermalnej z odwiertem o głębokości 110m, wynosi 12 % przez pięć lat użytkowania. Należy zauważyć, że przy obliczeniach i projektowaniu według Eskilsona (1987) nie bierze się pod uwagę gradientu geotermicznego, tylko używa stałe graniczne wartości temperatur.

### ***Otworowe wymienniki ciepła***

W otworowych wymiennikach ciepła BTES (*Borehole Thermal Energy Storage*) ważnymi czynnikami jest zdolność przewodzenia i magazynowania ciepła w skałach. Ilość odwiertów może dochodzić do dziesiątek, lub nawet setek. Każdy odwiert ma własny kolektor. Zaletą otworowych wymienników ciepła BTES, względem zwykłych pionowych wymienników ciepła, jest duża liczba blisko umieszczonych odwiertów (kilka metrów od siebie), co stwarza warunki do aktywnego przechowywania ciepła i zimna poprzez grzanie i chłodzenie większej objętości skał (rys. 2). Gdy ciepło jest odprowadzane od podłoża w zimnych porach roku podłoże skalne jest schładzane, co oznacza, że w okresie letnim można wykorzystać zmagazynowane zimno. Następnie skała ponownie się nagrzewa. Aktywne ładowanie jest warunkiem koniecznym użytkowania otworowych wymienników ciepła w celu poboru wystarczającej ilości energii podczas sezonu zimowego.



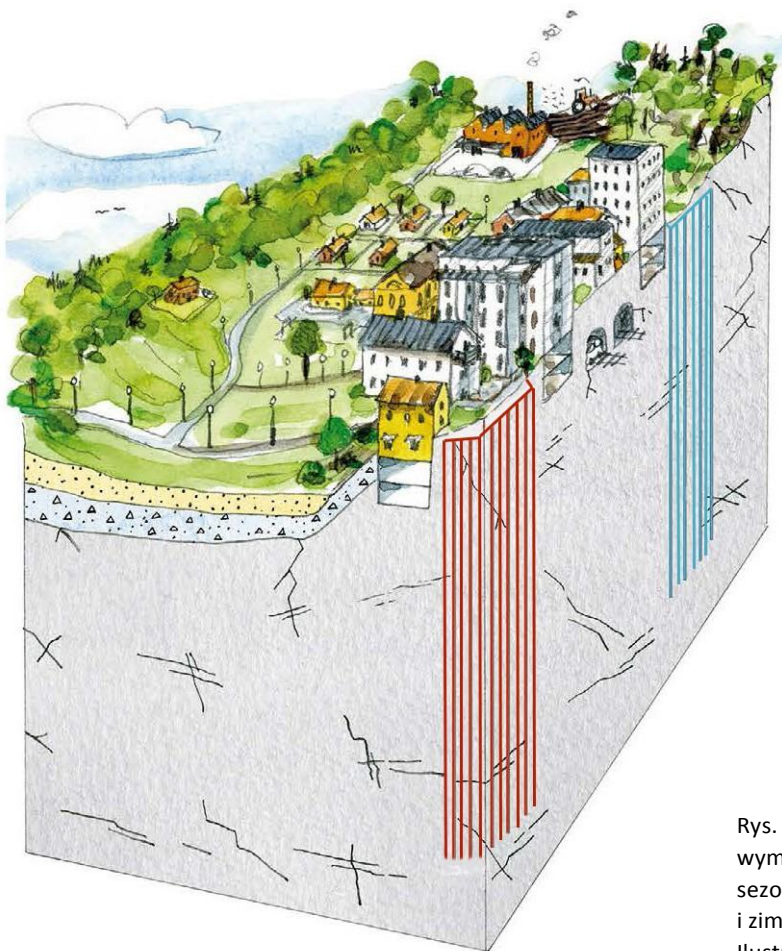
Rys. 1. Przykład geotermalnego systemu grzewczego dla pojedynczego gospodarstwa domowego.  
Ilustracja: Anna Jonson, ArtAnna.

Im system będzie większy, tym bardziej efektywny (do pewnego stopnia). System otworowych wymienników ciepła nie wymaga dużej powierzchni. Może być on umieszczony na przykład pod parkingami lub terenami zielonymi. Projektowanie liczby odwiertów, głębokości i odległości pomiędzy nimi, zależy od zapotrzebowania energii, warunków geologicznych i geograficznych oraz termicznych właściwości skał. System może być również używany do przechowywania tylko ciepła lub zimna, np. ciepła odpadowego, ciepła słonecznego, a także zimna z powietrza lub zimnej wody powierzchniowej.

### ***Płytki geotermia (poziome kolektory gruntowe)***

Poziome kolektory gruntowe stosuje się na obszarach o dużej głębokości gruntu lub na większej powierzchni. Kolektory są zakopane na głębokości około 1 m (rys. 3). W niektórych przypadkach, kolektory umieszcza się w kilku warstwach do głębokości 5-10 m. Podczas pracy instalacji, temperatura gruntu wokół kolektorów może spaść poniżej punktu zamarzania wody. Kiedy woda zamienia się w lód, uwalniana jest dodatkowa energia cieplna. Powstawanie lodu może jednak powodować pogorszenie sprawności pompy ciepła z powodu niskiej temperatury. Należy zauważyć, że również roślinność nad kolektorem może powodować obniżenie temperatury w gruncie. W zastosowaniu poziomych kolektorów ciepła, ładowanie odbywa się w okresie letnim tylko przez energię słoneczną. Zbyt wysoka temperatura gruntu w okresie letnim powoduje, że system nie może być stosowany do chłodzenia.





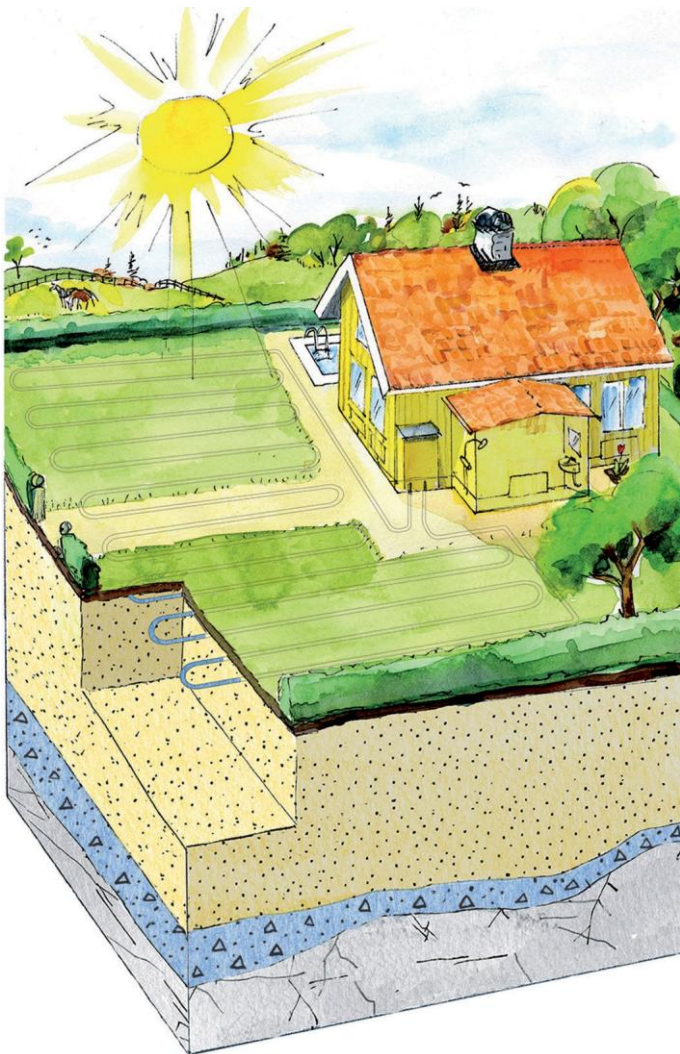
Rys. 2. Schemat otworowych wymienników ciepła (BTES) dla sezonowego magazynowania ciepła i zimna.  
Ilustracja: zmodyfikowana na podstawie rysunku Anna Jonson, ArtAnna.

### **Geotermia średnotemperaturowa - wody podziemne**

Przez geotermię wód podziemnych rozumie się, że woda podziemna jest bezpośrednio stosowana jako nośnik energii w kolektorze, tak jak w przypadku pionowych i poziomych systemów GWC (gruntowe wymienniki ciepła). Z wystarczającej ilości wody zawartej w porach i pęknięciach w gruncie i skałach powstają zasoby wód podziemnych. Przy dostępie do wystarczających zasobów wód podziemnych, woda jest pompowana w górę z jednego lub wielu odwiertów, chłodzona, a następnie zatłaczana z powrotem do górotworu (poziomu wodonośnego).

### **Warstwy wodonośne**

W systemie akumulatorów ciepła w warstwach wodonośnych (*Aquifer Thermal Energy Storage*) używa się cyrkulującej wody podziemnej jako nośnika energii, a magazynowanie energii odbywa się w gruncie, skałach i wodach podziemnych (rys. 4). System wykorzystuje jeden lub więcej „ciepłych” i „zimnych” odwiertów, które nie są ze sobą bezpośrednio powiązane. W okresie letnim woda gruntowa pompowana jest z zimnej strony, a po wymianie ciepła, ciepła woda jest pompowana na ciepłą stronę. W okresie zimowym, przepływ odbywa się w kierunku przeciwnym. Z ciepłej strony, ciepła woda gruntowa pompowana jest w górę, następuje wymiana ciepła do budynku, a następnie zimniejsza woda jest z powrotem pompowana do zimnej strony. W ten sposób tworzy się w tym samym złożu pewna objętość ciepłej wody wokół jednych studni i zimnej wody wokół innych studni.



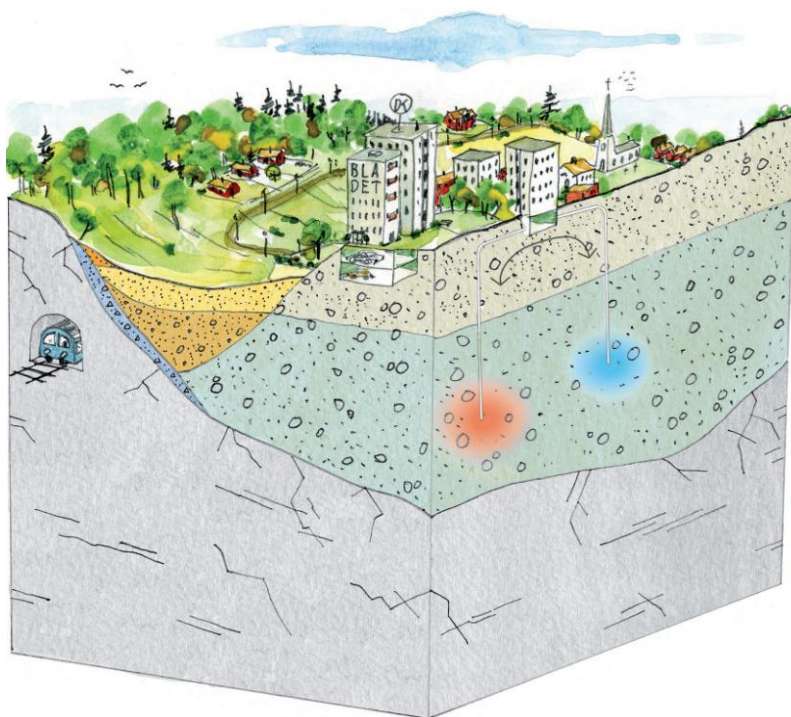
Rys. 3. Przykład systemu geotermalnego dla pojedynczego gospodarstwa domowego.  
Ilustracja: Anna Jonson, ArtAnna.

Woda podziemna przepływa w jedną i drugą stronę w tej samej warstwie wodonośnej, o ile nie występują większe lokalne strumienie wód podziemnych, które mogą dodatkowo wpływać na przepływ wody.

### ***Energia ciepła w jeziorach***

Zasada pozyskiwania energii cieplnej z jeziora, opiera się na kolektorze umieszczonym na dnie jeziora lub morza, gdzie temperatura jest zwykle nieco wyższa niż wyżej w wodzie. Funkcja ta jest w przybliżeniu taka sama jak w przypadku poziomych wymienników ciepła.

Zakotwiczenie w dnie jest bardzo ważne. Kolektor jest wyposażony w obciążniki, które zapobiegają unoszeniu się na powierzchnię. Im głębiej kolektor leży w mulach dennym, tym mniejsze ryzyko jego uszkodzenia. Jeśli kolektor jest umieszczony w jeziorze lub na dnie morza, powinien być odpowiednio oznakowany. W przeciwnym razie istnieje duże ryzyko, że kolektor uszkodzi się przez kotwy lub narzędzia połowowe. Nawet łódź może spowodować uszkodzenia, jeśli kolektor będzie umieszczony bez zabezpieczenia na brzegu. Istnieje stosunkowo mała liczba takich obiektów w Szwecji, a informacje z SGU na ich temat są bardzo ograniczone.



Rys. 4. Przykład akumulatorów ciepła w warstwie wodonośnej (ATES)

Ilustracje: Anna Jonson, ArtAnna.

### ***Geotermia średnio- i wysokotemperaturowa***

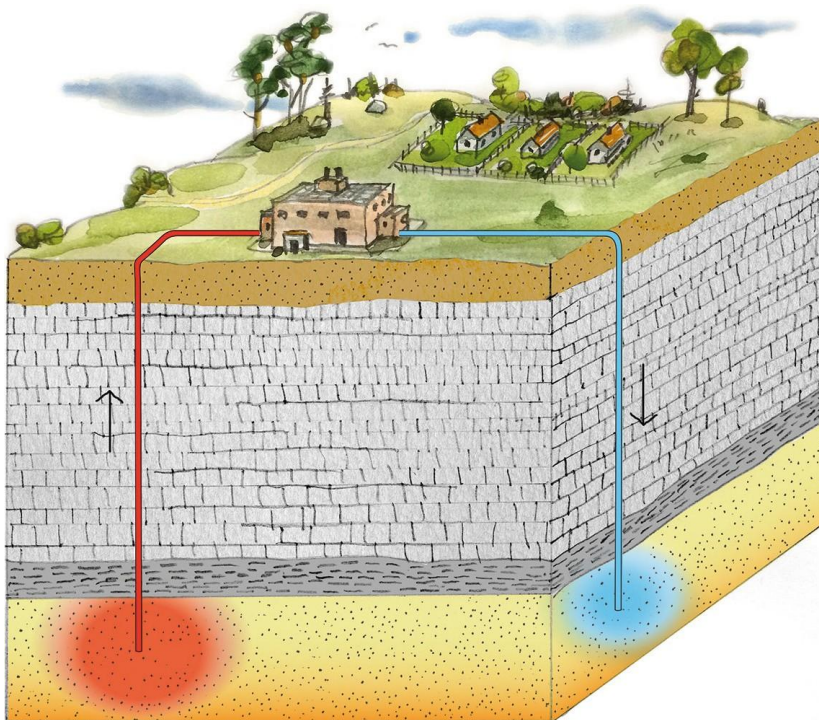
Ciepło jest wytwarzane i transportowane do skorupy ziemskiej poprzez procesy geologiczne we wnętrzu ziemi, zwłaszcza poprzez rozpad radioaktywny. Ciepło w skale wzrasta wraz z głębokością. Wzrost temperatury w szwedzkim podłożu skalnym wynosi zwykle  $15\text{--}30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Przy średniej temperaturze powierzchni gruntu  $10^{\circ}\text{C}$ , temperatura na głębokości 2 km wynosi około  $40\text{--}70^{\circ}\text{C}$ . W innych krajach z cieńszą skorupą ziemską lub w obszarach o aktywności wulkanicznej, temperatura może być znacznie wyższa. Na pewnych obszarach, na przykład w Islandii, gdzie dodatkowo występuje para wodna, energia w systemach geotermii wysokotemperaturowej może być pozyskiwana ze stosunkowo płytkich odwiertów. W Szwecji wymagana głębokość wiercenia wynosi 6-7 km, aby temperatura w podłożu skalnym była wystarczająco wysoka.

Geotermia wysokotemperaturowa jest idealna szczególnie dla dużych instalacji podłączonych do systemów ciepłowniczych. Energję geotermalną można użyć zarówno do produkcji ciepła jak i energii elektrycznej, w zależności od temperatury wody podziemnej na danej głębokości w podłożu skalnym. Warunkiem korzystania z dużej ilości ciepła zgromadzonego w głębokim podłożu skalnym jest jednak wydobycie wystarczająco dużej energii na powierzchnię. Najlepsze warunki do korzystania z energetyki geotermalnej występują zatem na obszarach ze skałami osadowymi, gdzie dodatkowo występują głęboko położone warstwy wodonośne takie jak porowate i przepuszczalne warstwy piaskowca. Na obszarach ze skałami krystalicznymi konieczne są naturalne pęknięcia w skale, grunt wodonośny lub możliwość hydraulicznego rozbicia skały.

Energja geotermalna (średnotemperaturowa) jest pozyskiwana przez pompowanie wód podziemnych z głębokich odwiertów. Ciepło jest uwalniane w wymienniku ciepła, a ochłodzona woda jest z powrotem pompowana na tę samą głębokość, z której była pobierana (rys. 5). Cykl ten jest systemem zamkniętym pod ciśnieniem, co zapobiega wytrąceniom składników chemicznych i wydzielaniu gazów rozpuszczonych w wodzie. Odwierty do pozyskiwania i zrzutu są umieszczone w takiej odległości od siebie, zwykle około kilometra, żeby zimna strona w czasie całego okresu eksploatacji (zazwyczaj 25-30 lat) nie miała wpływu na temperaturę w pobliżu odwiertu z którego pozyskiwana jest energia.

W Szwecji geotermia średnio- i wysokotemperaturowa jest wykorzystywana w miejscowości Lund, która posiada taką instalację od połowy lat 80-tych. Dziś system energii geotermalnej stanowi jedną czwartą energii ciepłowniczej.





Rys. 5. Przykład instalacji geotermalnej z przepuszczalną warstwą w osadowej sekwencji skalnej, służącą do wymiany ciepła. Ilustracje: Anna Jonson, ArtAnna.

Stosowana jest woda podziemna o temperaturze około 22 stopni, z piaskowców zalegających na głębokości 400-800 m. Instalacja ma moc 45 MW i od uruchomienia wytworzyła 7210 GWh ciepła, co odpowiada energii w 800 000 m<sup>3</sup> oleju i o emisji dwutlenku węgla mniejszej w przybliżeniu o 1,3 miliona ton.

Inne podobne projekty powstają w południowej Szwecji, ale nie zostały jeszcze zrealizowane. W Kopenhadze od 2004 znajduje się system, w którym wykorzystuje się wodę o temperaturze 60 stopni z głębokości 2400m.

Poza Skanią, odpowiednie warunki dla energii geotermalnej w skałach osadowych występują głównie na Gotlandii i w obszarze Siljan. W krystalicznym podłożu skalnym, badania i testy przeprowadzone były w Björkö i na zachód od Sztokholmu (Henkel i inni 2004) oraz w obszarze Göteborgu (HDR projekt, Hot Dry Rock, Wallroth i inni 1999). Testowe odwierty w głębokich strefach uskoku zostały wykonane w Lund (Björn & Rosberg 2006).

### **Rodzaje studni głębinowych**

Istnieją dwa główne rodzaje konstrukcji studni używanych do energii geotermalnej w Szwecji: studnie wiercone niefiltrowe i studnie filtrowe. Wybór odpowiedniej konstrukcji zależy od warunków geologicznych oraz wymagań ilościowych i jakościowych. Dla zamkniętych systemów geotermii niskotemperaturowej używa się zazwyczaj wierconych studni. W przypadku używania wód gruntowych (układy otwarte) stosuje się częściej studnie filtrowe. Na obszarach o osadowym podłożu skalnym z dobrym przepływem wody możliwe jest zastosowanie otwartych systemów studniowych.

Studnie wiercone są najczęściej stosowanym typem studni. W krystalicznym podłożu skalnym ten typ studni daje zwykle ok 100-1000 l wody na godzinę. Wydajność może być jednak znacznie wyższa, w przypadku występowania większych szczelin i pęknięć. Wydajność zamkniętej instalacji geotermicznej zależy częściowo od przepływu wody w skale, ale przede wszystkim, w odwiercie musi znajdować się woda lub materiał wypełniający, który umożliwia przenoszenie ciepła z gruntu (skały) do ciekłego nośnika w kolektorze. Poziom zwierciadła wód podziemnych odgrywa zatem znacznie większą rolę niż pojemność studni. Przepływ wody podziemnej, między różnymi poziomami w odwiercie lub w warstwie nośnej, może znacząco zwiększyć wydajność

energetyczną odwiertu. Przy wierceniu przez kilka warstw wodonośnych ze zróżnicowaną jakością wody należy zwrócić szczególną uwagę, żeby wody o różnej jakości nie zostały zmieszane ze sobą. W takim przypadku, należy uszczelnić cały odwiert podczas instalacji kolektora. Rozgraniczenie pomiędzy słodką a słoną wodą podziemną, można wykonać za pomocą urządzeń technicznych w studniach lub przez zasypywanie.

Studnie filtrowane budowane są głównie w gruntach gruboziarnistych porowatych, takich jak piasek czy żwir. W niektórych przypadkach mogą one być także wykonane w pęknięciu skały (pomocniczy filtr) albo w luźnych skałach osadowych z dobrym przepływem wody. Sama nazwa konstrukcji studni pochodzi od rur studziennych, filtrowych, przez które wpływa woda. Wyjątkowo stosuje się również rury filtracyjne z tworzywa sztucznego. Szerokość szczeliny jest dopasowywana do frakcji ziaren w gruncie, aby zapobiec przedostawaniu się materiału do studni. Ponieważ studnie filtrowe często pozyskują dużą ilość wody są wykorzystywane w połączeniu z magazynowaniem ciepła i zimna w warstwach wodonośnych lub przy większych instalacjach grzewczych i w niektórych rodzajach słabo skonsolidowanych skał osadowych.

### **Technologia wiercenia**

Przy studni wierconej, używa się często młot udarowy na sprężone powietrze (obrót i uderzenie). Studnie wiercone wykonuje się w dwóch etapach:

- Etap 1 obejmuje przewiercenie się przez grunt aż do podłoża skalnego. Zazwyczaj stosuje się technologię, w której wiercenie i układanie rur okładzinowych odbywa się jednocześnie. Rury okładzinowe powinny być umieszczone co najmniej 2 m w skale, aby zapewnić ominięcie szczelin na powierzchni skał. Następnie rury okładzinowe są mocowane na stałe w podłożu skalnym. Uszczelnianie pomiędzy rurami okładzinowymi a skałą jest bardzo ważne. Uniemożliwia ono przedostanie się wody podziemnej, gruntu i materiału skalnego do wnętrza odwiertu. Dla małej głębokości szczególnie ważne jest, żeby usadowić rury okładzinowe głęboko w skale, ponieważ ryzyko zanieczyszczenia wzrasta wraz ze spadkiem głębokości gruntu. W Normbrunn-07 (WDT 2008) podane jest, że minimalna odległość z rurami okładzinowymi wynosi 6 m, licząc od powierzchni gruntu.
- Etap 2 obejmuje wiercenie samego otworu aż do momentu osiągnięcia projektowej głębokości. Dla studni wierconych, najczęstsze wymiary to 4.5" (115 mm), 5.5" (140 mm) lub 6.5" (165 mm). Należy zauważyć, że jest to średnica wiertła. Otwór wiertniczy może mieć większą lub mniejszą średnicę w słabo skonsolidowanej skale, w skałach osadowych lub skałach krystalicznych.

### **PRZYKŁADOWE INFORMACJE Z SGU**

W tej sekcji przedstawiono przykładowe informacje SGU, które mogą być istotne dla oceny wstępnych warunków dla różnych typów systemów energii geotermalnej.

Baza potrzebnych informacji geologicznych zależy od typu planowanej instalacji geotermalnej. Dla pozyskiwania lub magazynowania energii w podłożu skalnym, informacje na temat podłoża gruntowego i właściwości termicznych skał są niezbędne do prawidłowego zaprojektowania systemu. Dla wstępnej analizy kosztów systemu, najbardziej decydujące są szczegóły dotyczące temperatury gruntu, przewodności cieplnej i miąższości gruntu, ponieważ to od tych parametrów zależy ilość i głębokość odwiertów. Dane dotyczące głębokości gruntu znajdują się w archiwum SGU, na mapach geologicznych i mapach miąższości gruntu prezentowanych poniżej. Głębokości gruntu mogą różnić się w niewielkich odległościach (często bardziej niż wynika to z map), ale dane mogą być podstawą do ogólnej oceny warunków. Na mapach wód podziemnych SGU, opisano głównie większe zasoby wód podziemnych w podłożu, które mogą być używane do systemów magazynowania wody w warstwach wodonośnych. Jednorodność podłoża skalnego, szczeliny i porowatość są czynnikami, które mogą mieć wpływ na efektywność instalacji, ale nie mogą zostać ocenione na podstawie informacji z SGU.



### **Podłoże skalne**

SGU dostarcza wiele informacji na temat szwedzkiego podłoża skalnego. Stworzono także wiele map i opisów do map. Starsze informacje zostały zdigitalizowane, a bazy danych zostały utworzone. Różnego rodzaju analizy, między innymi w celu ustalenia wieku skał, historii deformacji, składu chemicznego i mineralogicznego, zostały w znacznym stopniu wykonane, a wyniki są gromadzone w bazach danych SGU.

Mapy podłoża skalnego SGU pokazują kompleksowy dwuwymiarowy model rodzajów podłoża skalnego, znajdującego się na danym obszarze. Na podstawie map można uzyskać rozkład warstw, teksturę i strukturę podłoża skalnego. Z map wynika również obecność dużych stref deformacji w podłożu skalnym.

Na drukowanych mapach SGU przedstawiono bardziej uproszczone informacje, ale baza map będzie bardziej przydatna w kontekście regionalnym i przy zarządzaniu systemami informacji geograficznych (GIS).

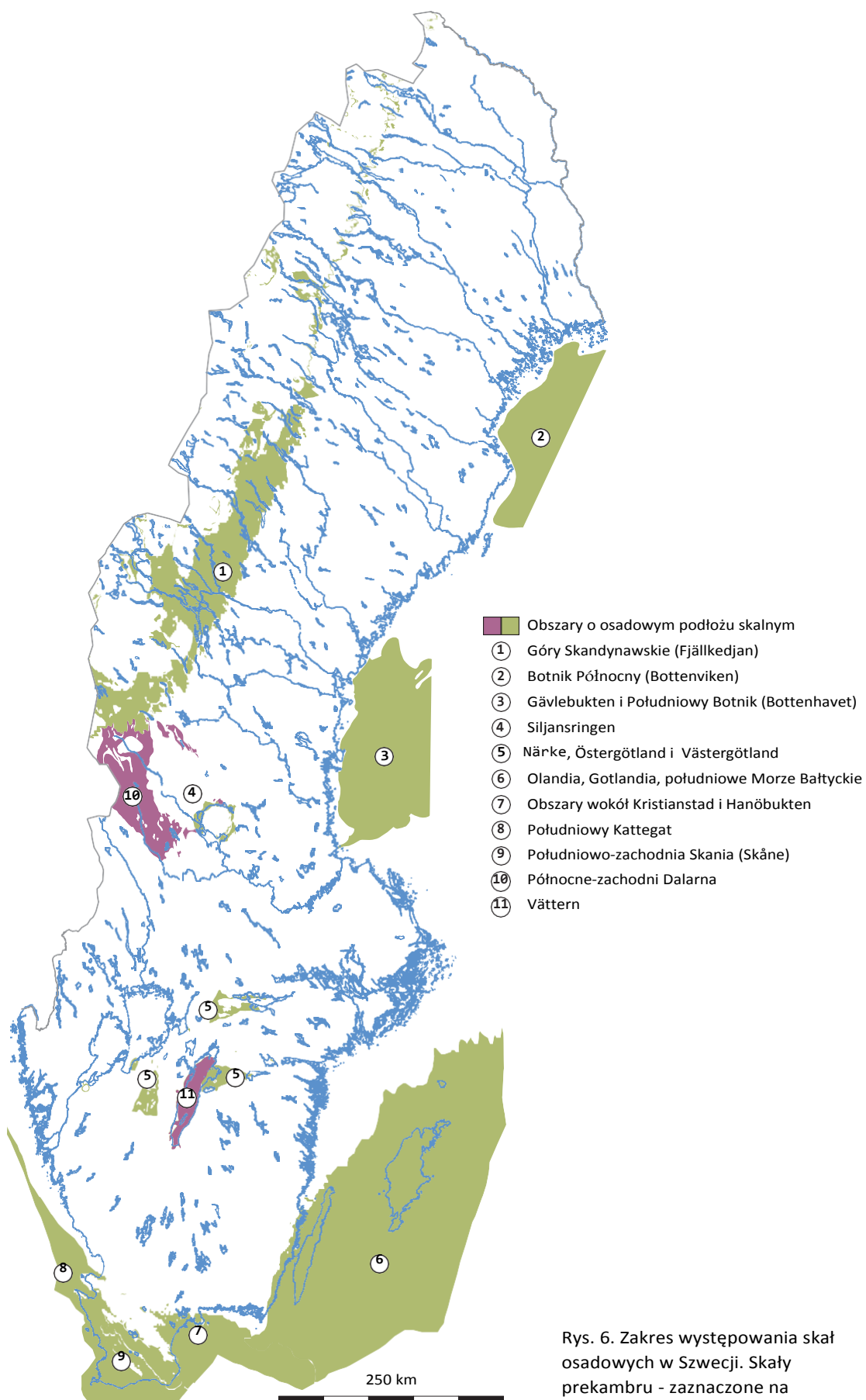
Bardziej szczegółowe informacje na temat podłoża skalnego można znaleźć w ogólnej bazie danych SGU, która jest bazą danych wszystkich miejsc, zbadanych i opisanych przez geologów (udokumentowane właściwości skał). W wielu przypadkach pobrano próbki do różnych celów analitycznych.

### **Struktura i właściwości podłoża skalnego**

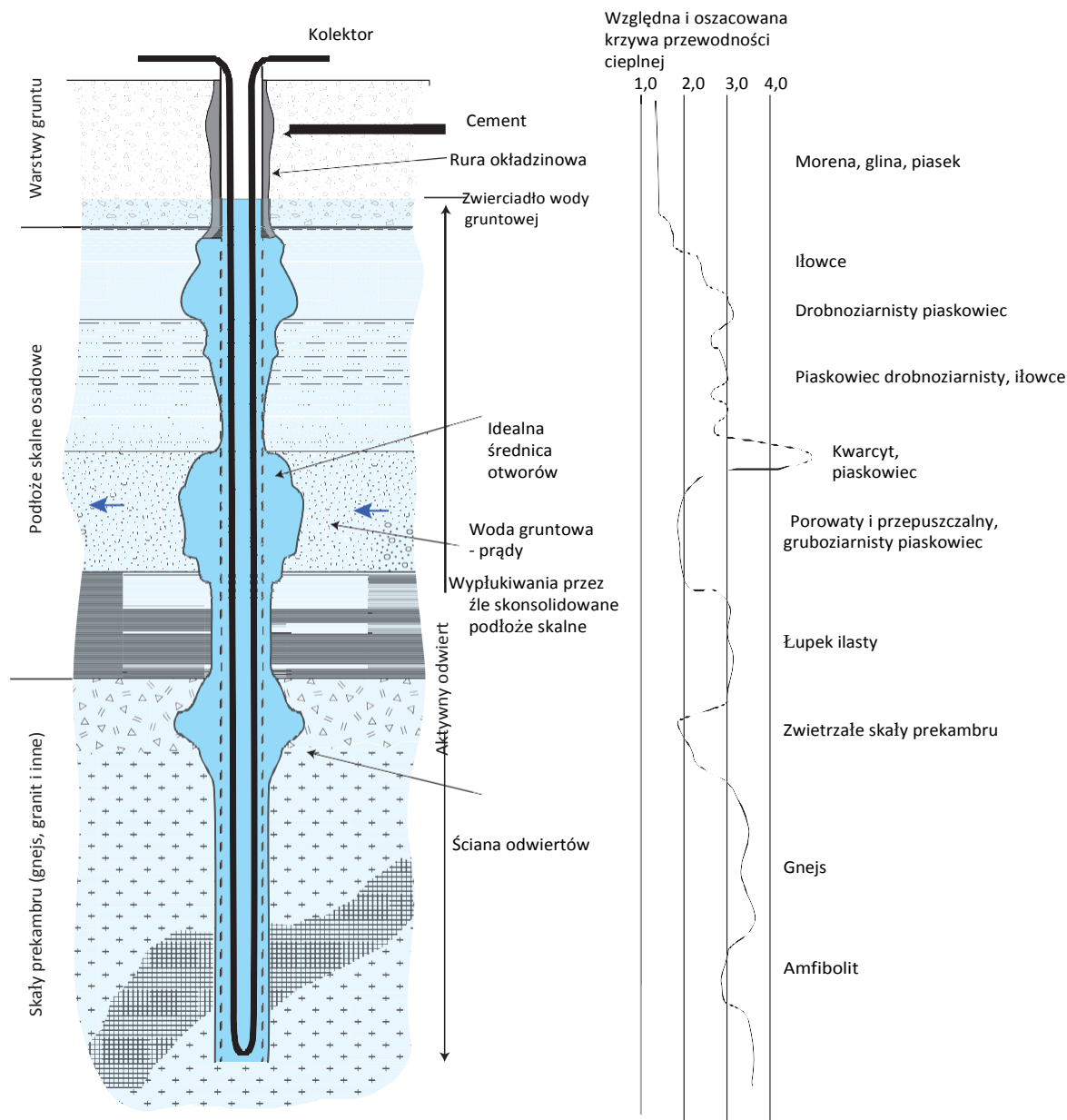
Skały są podzielone na trzy główne typy: magmowe, osadowe i metamorficzne. Skały magmowe powstają na skutek zastygania lawy (magmy). Jeżeli lava dociera do powierzchni ziemi tworzy skały wulkaniczne, jak bazalt czy ryolit. Na powierzchni ziemi lava ochładza się stosunkowo szybko, co sprawia, że powstające skały są drobnoziarniste. Kiedy lava stygnie w skorupie ziemskiej, powstają takie skały jak granit czy gabbro. W tym przypadku powstawanie kryształów odbywa się w dłuższym w czasie, ponieważ chłodzenie jest wolniejsze. Skała staje się gruboziarnista. Skały osadowe, takie jak wapień, piaskowiec czy łupki powstają w wyniku gromadzenia się osadów na powierzchni gruntu lub wody, które następnie podlegają kompaktacji i cementacji. Skały metamorficzne, takie jak gnejsy, amfibolit czy marmur, powstają przez konwersję magmowych lub osadowych skał przy wysokim ciśnieniu i temperaturze, na przykład w procesie górotwórczym.

Najczęściej, podłoże skalne w Szwecji składa się ze skał krystalicznych, takich jak różnego rodzaju granity czy gnejsy. Skały osadowe występują rzadziej (rys. 6). Skały te są w wielu przypadkach bardziej porowate, o większym przepływie wody w porównaniu do skał krystalicznych, które z kolei mają wpływ na właściwości termiczne. Dlatego, z geoenergetycznego punktu widzenia, wiedza na temat gruntu i skał na danym obszarze jest bardzo ważna. Może to mieć kluczowe znaczenie przy wybieraniu odpowiedniej metody magazynowania energii. Ruch wód podziemnych może również być istotny dla efektywności instalacji geotermicznej.

Obszary, na których występuje osadowe podłoże gruntowe, to głównie południowa Szwecja, Olandia i Gotlandia, Västergötland, Östergötland, Närke, Dalarna, Jämtland i góry skandynawskie (rys. 6). Uwarstwiona struktura jest typowa dla skał osadowych. Struktura poszczególnych warstw, kompozycja litologiczna, porowatość, gęstość i zawartość wody może różnić się znacząco między poszczególnymi warstwami. Ze względu na te czynniki, właściwości termiczne w skałach osadowych są bardzo zróżnicowane (Andolfsson 2013). W przypadkach, w których układ warstw składa się ze skał o różnych właściwościach termicznych może to oznaczać nieregularne oddziaływanie termiczne w sąsiedztwie odwiertu. Zazwyczaj nie ma to istotnego wpływu na zakres mocy instalacji, ale może mieć znaczenie dla oceny oddziaływania na sąsiednie odwierty, ponieważ zakres oddziaływania termicznego w pojedynczych częściach podłoża skalnego może być dużo wyższy niż w całym odwiercie. Obecnie istnieją narzędzia (oprogramowanie), które mogą być wykorzystane do oceny tych przypadków, pod warunkiem, że dostępne są wiarygodne dane.



Rys. 6. Zakres występowania skał osadowych w Szwecji. Skały prekambru - zaznaczone na fioletowo, skały fanerozoiku - na zielono.



ca 150 m

Rys. 7. Schemat odwiertu w osadowym i krystalicznym podłożu skalnym. Na rysunku pokazane są różne czynniki, które mogą wpływać na moc instalacji: warunki wody gruntowej, twardość, ukształtowanie, wietrzenie i przewodność cieplna podłoża skalnego. Wykres na prawo pokazuje zmiany przewodności cieplnej.

Skały osadowe o różnej miąższości warstw zalegają nad skałami krystalicznymi. Często zdarza się, że warstwy są cienkie, co może prowadzić do wiercenia otworu przez zarówno skały osadowe jak i krystaliczne, o różnych właściwościach termicznych i podatności na wiercenie.

Oprócz struktury i zawartości wody, skała osadowa różni się od krystalicznej tym, że często ma bardzo różną twardość. W pewnych miejscach, wiercenie może być utrudnione przez bardzo twardą skałę, taką jak kambryjski kwarcyt, lub z powodu słabo skonsolidowanych skał, które często zalegają w młodszym osadowym podłożu skalnym w Skanii. Odwiert w słabo skonsolidowanym podłożu skalnym może mieć większą średnicę, co może mieć wpływ na lepsze przenoszenie ciepła i zimna pomiędzy odwiertem a skałą (rys. 7). W niektórych częściach Szwecji występuje silne wietrzenie skał oraz duże strefy uskoku i pęknięć, które mogą być dużym utrudnieniem podczas wiercenia.

Występowanie glin znacznie utrudnia osiągnięcie projektowanej głębokości odwiertu. Przykładowo w Skanii, wietrzenie kaolinowe występuje stosunkowo często. Istnieją dane o podłożu skalnym w procesie wietrzenia i powstawania kaolinu aż do głębokości 100m. Wietrzenie występuje bardzo często lokalnie, przez co trudno jest przewidzieć jego zakres. Prawdopodobieństwo wietrzenia jest największe w sąsiedztwie pęknięć i uszkodzeń. Lokalnie, na przykład, w Östergötland w skale osadowej występują biogazy (patrz Erlström 2014), które mogą powodować problemy podczas wiercenia i montażu instalacji geotermalnych.

Mimo, że te problemy nie są powszechne, i bardzo często można je rozwiązać, należy mieć na uwadze, że mogą występować lokalne trudności podczas wykonywania odwiertu.

### ***Skład skał mineralogicznych***

Rozkład skał mineralnych jest określany za pomocą analizy modalnej. Analizy przeprowadza się na cienkich płytkach o grubości 30 mikrometrów, za pomocą m.in. mikroskopu polaryzacyjnego. Każde ziarno minerału, które trafi pod mikroskop zostanie zarejestrowane. Preparat jest przemieszczany na określoną odległość i wykonuje się następną rejestrację. Liczba zliczonych punktów wynosi około 500. Metoda punktowa ma na celu zapewnienie informacji statystycznych do obliczania procentowego rozkładu minerału w próbce skalnej. Wynik podawany jest w procentach objętościowych.

Obecnie istnieje około 6500 wyników analizy w bazie danych SGU (patrz rys. 8). Pochodzą one głównie z bazy danych opracowanej w latach 80-tych, celem pokazania przewodzenia ciepła różnych rodzajów skał (Sundberg i inni 1985). Zebrano wtedy dużą ilość wyników z wcześniej opublikowanych arkuszy map, głównie map SGU z serii Af, a uzyskane wyniki zostały następnie wykorzystane jako podstawa do sporządzenia map przewodnictwa cieplnego, a także jako dodatek do serii map SGU Ah i niektórych raportów (np. Lilja 1981, Karlqvist i inni, 1982). Dane te były stopniowo uzupełniane informacjami z różnych badań skał przeprowadzonych na początku XXI wieku.

Oprócz danych dotyczących minerałów z analizy modalnej, dokonano próby użycia danych z geochemicznej bazy danej SGU w celu określenia składu mineralogicznego skał. W bazie danych istnieją tysiące danych analitycznych skał z różnych części Szwecji. Mimo to, obliczenie rozkładu mineralnego za pomocą jedynie tych danych może okazać się trudne. Inną możliwością jest określenie składu mineralnego skały za pomocą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD). W połączeniu z danymi chemicznymi, można uzyskać wiarygodne dane dotyczące rozkładu minerału, co następnie może być wykorzystane do obliczenia przewodnictwa cieplnego (Schwarz i inni 2010). Analiza XRD jest jednak czasochłonną metodą, która nie jest bezpośrednio kwantytatywna.

### ***Parametry fizyczne***

Możliwy zakres mocy w odwiercie geotermalnym zależy głównie od temperatury i przewodności cieplnej w podłożu skalnym. Przewodność cieplna zależy zarówno od składu mineralnego w skale oraz jego właściwości fizycznych, takich jak porowatość czy przepuszczalność. Reasumując, są to parametry, które określają niezbędną głębokość odwiertu w oparciu o żądany zakres mocy. Oto krótkie wyjaśnienie właściwości termicznych, które mają wpływ na instalacje geotermalne.

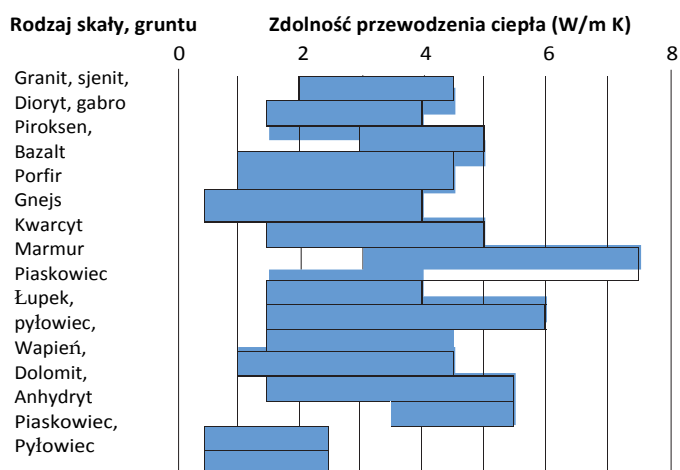
*Przewodność cieplna* ( $\lambda$ ) mierzona jest ( $W/m \cdot K$ ) i określa właściwości skały jako przewodnika energii cieplnej. Niektóre skały dają lepszą wymianę ciepła, zależnie od przewodności cieplnej skały, na przykład od 1,7 do 3,4  $W / m \cdot K$  bazalt czy granit (np. Schön 2004), patrz rys. 9. Skład mineralogiczny, struktura, porowatość i zawartość wody w podłożu skalnym, to czynniki, które mają wpływ na przewodność cieplną.





Rys. 8. Punkty pobierania próbek do analizy punktowej (n = 6500). (N = 6500).

Dane geograficzne cyfrowych map Krajowego Urzędu Geodezyjnego.



Rys. 9. Przewodność cieplna skały zależy od składu minerałów, porowatości, gęstości i zawartości wody (rys. Zmodyfikowano na podstawie Schön 2004). Suche i porowate skały osadowe mają najniższe przewodnictwo cieplne, o minimalnej wartości poniżej 1 W / m·K. Twarde i gęste piaskowce bogate w kwarc, na przykład kwarcyt, na ogół mają najwyższe wartości, maks. 7 W/m·K. Dla porównania: przewodność cieplna wody wynosi 0,55 W/m·K, dla lodu około 2,2 W/m·K a dla powietrza około 0,025 W/m·K.

Najważniejszym minerałem w kwestii przewodności cieplnej w podłożu skalnym jest kwarc. Przewodność cieplna jest najwyższa w skałach bogatych w kwarc, np. kwarcytach lub piaskowcach. Luźny osad wykazuje najniższą wartość. W warstwach osadowych przenoszących wodę, zależy od składników mineralnych oraz stosunku objętości wody w porach do ziaren. Istnieje również empiryczny związek pomiędzy przewodnością cieplną materiału skalnego i gęstością, gdzie przewodność cieplna rośnie wraz ze wzrostem gęstości. Częściowo przeciwstawne warunki dotyczą skał krystalicznych, granitoidów o różnej zawartości kwarcu. Odstępstwa mogą występować dla kilku podstawowych skał zawierających „ciężkie” minerały takie jak piroksen czy oliwin przy stosunkowo wysokiej wartości (tabela 1, patrz także Sundsberg i inni 2009).

*Dyfuzyjność cieplna* jest właściwością, która opisuje zmianę temperatury w podłożu skalnym jako funkcję czasu, w jakim doprowadzane jest ciepło wskutek gradientu temperatury. Dyfuzyjność cieplną oblicza się jako stosunek pomiędzy przewodnością cieplną i pojemnością cieplną i jest wyrażona w  $m^2/s$ .

*Temperatura gruntu* zmienia się okresowo, codziennie i w ciągu roku. Wynika to ze zróżnicowania w ilości energii słonecznej, która dociera na powierzchnię, oraz że to ciepło jest zwracane do atmosfery, choć z pewnym opóźnieniem.

Tabela 1. Zestawienie wartości  $\lambda$  dla różnych minerałów przy obliczaniu przewodnictwa cieplnego dla skały.

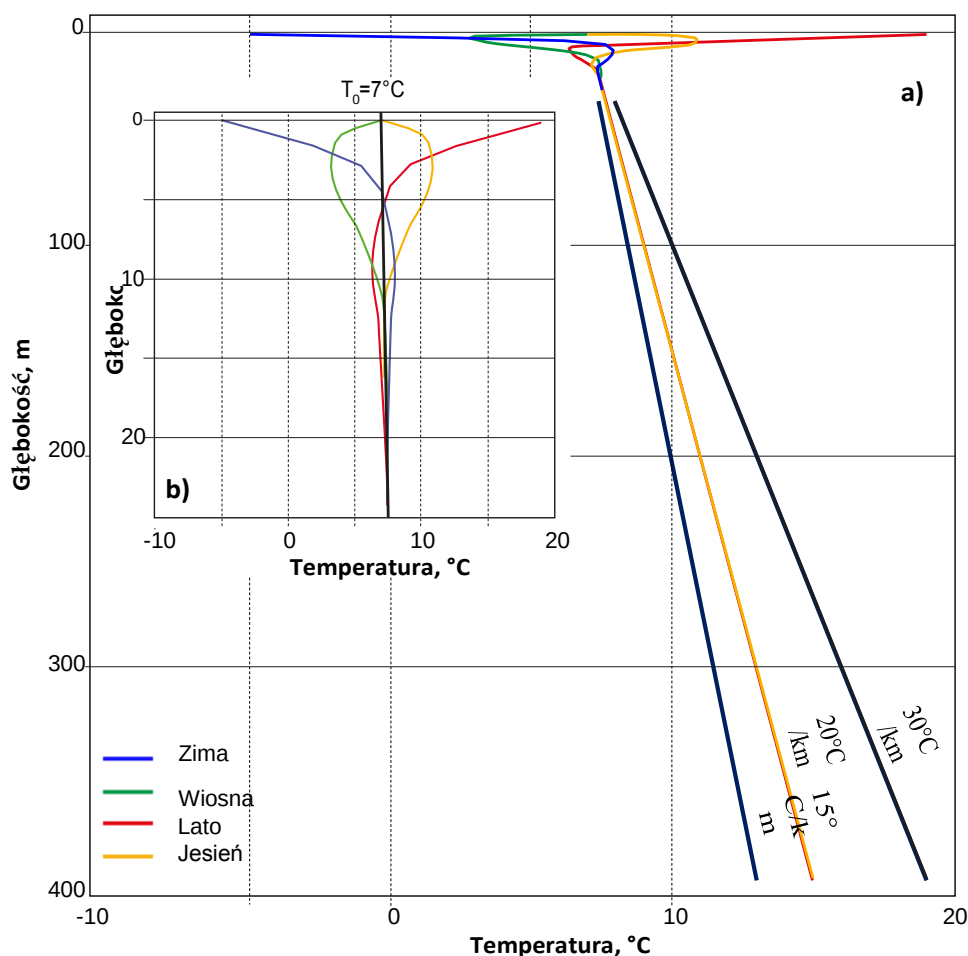
| Minerał         | Wartość $\lambda$<br>(W/m K) | w. referencyjna | Minerał                   | Wartość $\lambda$<br>(W/m K) | w. referencyjna |
|-----------------|------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|
| Albit           | 2,1                          | a)              | Minerały nieprzezroczyste | 3,0                          | b)              |
| Allanit         | 3,0                          | b)              | Ortoklaz                  | 2,3                          | a)              |
| Amfibol         | 2,8                          | f)              | Ortopiroksen              | 4,3                          | f)              |
| Andaluzyt       | 7,6                          | a)              | Plagioklaz                | 2,3                          | f)              |
| Anortyt         | 2,1                          | c)              | Prenit                    | 3,6                          | f)              |
| Apatyt          | 1,4                          | a)              | Pumpellyit                | 3,0                          | b)              |
| Biotyt          | 2,0                          | a)              | Piryty                    | 19,2                         | d)              |
| Kordieryt       | 2,0                          | f)              | Piroksen                  | 4,3                          | e)              |
| Diopsyd         | 4,7                          | a)              | Serycyt                   | 2,3                          | ***)            |
| Epidot          | 2,8                          | a)              | Serpentyn                 | 3,5                          | a)              |
| Fluoryt         | 9,5                          | a)              | Sylimanit                 | 9,1                          | a)              |
| Granat          | 3,3                          | a)              | Skapolit                  | 2,6                          | f)              |
| Hematyt         | 11,3                         | a)              | Tytanit                   | 2,3                          | a)              |
| Hornblenda      | 2,8                          | a)              | Cyrkon                    | 5,5                          | a)              |
| Kalcyt          | 3,6                          | a)              | Inne                      | 3,0                          |                 |
| Skaleń potasowy | 2,5                          | a)              |                           |                              |                 |
| Klinopyroksen   | 4,3                          | *)              |                           |                              |                 |
| Klinozoisyt     | 2,8                          | **)             |                           |                              |                 |
| Chloryt         | 5,2                          | a)              |                           |                              |                 |
| Kwarcyt         | 7,7                          | a)              |                           |                              |                 |
| Cyjanit         | 14,2                         | a)              |                           |                              |                 |
| Magnetyt        | 5,1                          | a)              |                           |                              |                 |
| Mikroklin       | 2,5                          | a)              |                           |                              |                 |
| Monacyt         | 1,1                          | f)              |                           |                              |                 |
| Muskowit        | 2,3                          | a)              |                           |                              |                 |
| Oliwin          | 4,5                          | f)              |                           |                              |                 |

- a) Horai 1971  
b) Sundberg i inni. 2008  
c) Dreyer 1974  
d) Clauser & Huenges 1995  
e) Sundberg i inni 1985  
f) Horai & Simmons 1969  
\*) Jak dla piroksenu  
\*\*) Jak dla epidotu  
\*\*\*) Jak dla muskowitu

Temperatura w gruncie jest wynikiem równowagi energetycznej i właściwości termicznych. Latem, strumień ciepła słonecznego jest większy niż w okresie zimowym, kiedy to strumień ciepła z wnętrza Ziemi jest dominujący. Roczna różnica temperatury przenika w niezakłóconych warunkach do około 15-20m w gruncie (fig. 10). Poniżej tego poziomu, gradient geotermiczny określa warunki temperaturowe. Na większych głębokościach, temperatura w ziemi może zależeć również od ruchów wód podziemnych.

Postępująca zmiana klimatu (średnia roczna temperatura w atmosferze wzrosła przez ostatnie 100 lat) przyczyni się również do nagrzania podłoża skalnego (Lachenbruch i inni 1982). Rosnąca temperatura w wyniku tego działania wynosi w szwedzkich warunkach około 1°C, aż do 40 lub 50 m głębokości. Podobny proces ogrzewania ziemi miał miejsce w Skandynawii po ostatnim zlodowaceniu około 10 000 lat temu. Przez zlodowacenia skała była schłodzona do około 2000 m głębokości (Beltrami i inni 2014). Podczas późniejszego ciepłego okresu, podłoże skalne w Skandynawii powoli się ogrzało, także z pomocą słońca. Jednak nie ma podstaw, dla których można by całkowicie zdefiniować energię geotermalną jako zmagazynowaną energię słoneczną. Twierdzenie, że zmagazynowana energia słoneczna stanowi energię termalną jest błędne (Rybach 2012), ponieważ warunki termiczne na powierzchni Ziemi są w równowadze.

*Temperatura w podłożu skalnym* ma wpływ na pozyskiwanie ciepła, ponieważ możliwe obniżenie temperatury w odwiercie jest decydujące dla zakresu mocy instalacji.

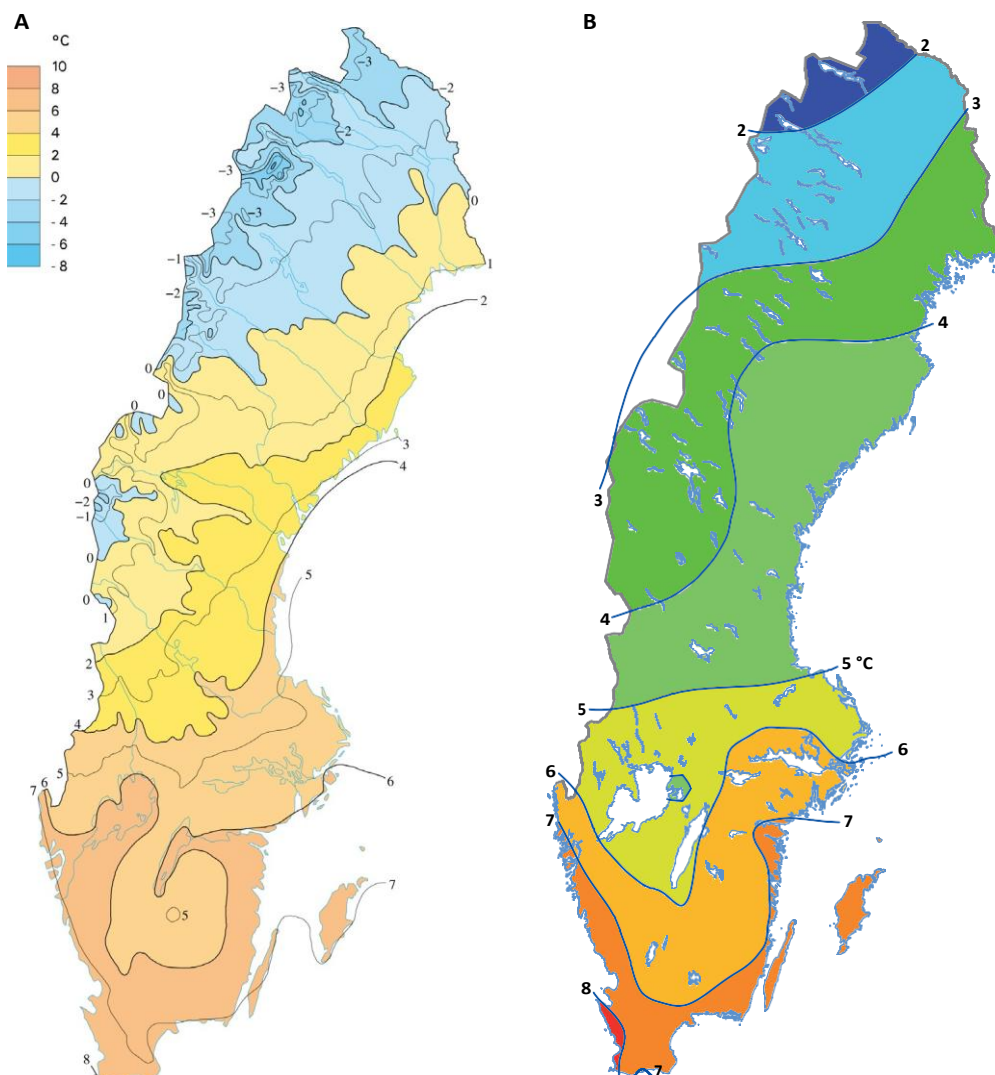


Rys. 10. Schematyczne wykresy, które pokazują temperaturę podłoża na głębokości w ciągu roku oraz w niezakończonych warunkach (żadne ciepło nie jest pobierane ani dostarczane). Na powierzchni i do głębokości około 15 m, temperatura zależy, z opóźnieniem czasowym, od sezonowego promieniowania słonecznego (załącznik B). Poniżej tego poziomu warunki temperaturowe zależą (głównie) od gradientu geotermicznego z wartością pomiędzy 15 i 30°C/km (a). Średnia temperatura gruntu  $T_0$  została przyjęta na poziomie 7 °C (porównywalna z warunkami w Mälardalen), roczna różnica temperatur wynosi do  $\pm 12^\circ\text{C}$ ; Przewodność cieplna w podłożu skalnym wynosi 3,5 W / m · K a pojemność cieplna (objętościowe), wynosi 2,5 MJ/K·m<sup>3</sup>.

Temperatura skał (i wód podziemnych), na głębokości kilkudziesięciu metrów w południowej Szwecji w uproszczeniu może być przyjęta jako średnia temperatura na zewnątrz (rys. 11). Na północ od Norrlandii średnia temperatura podłoża skalnego jest o 1-4 stopni wyższa niż temperatura powietrza. Może to być związane z pokrywą śnieżną, która skutecznie izoluje grunt w okresie zimowym. Temperatura gruntu w roku 2015 wynosiła 9-10°C na południu i < 3°C na północy. W Skanii temperatura zwiększa się o około 30°C/km, a gradient geotermiczny na północy Szwecji wynosi 15-20°C/km.

Geotermiczny *strumień ciepła* jest miarą energii cieplnej promieniującej z wnętrza Ziemi. Stosunkowo płytkie warstwy gruntu i podłoża skalnego, do głębokości kilkudziesięciu metrów (patrz rys. 10), są również pod wpływem promieniowania słonecznego.

Strumień ciepła słonecznego w okresie letnim może osiągnąć więcej niż 1000 W/m<sup>2</sup>. „Stabilny” klimat na Ziemi zakłada jednak, że istnieje równowaga pomiędzy promieniowaniem dostającym się i wydobywającym się z wnętrza Ziemi (Kiehl & Trenberth 1997). W obliczeniach równowagi, takie promieniowanie cieplne miałoby katastrofalne skutki dla naszej planety. Promieniowanie cieplne może być wykorzystane w zainstalowanych systemach grzewczych w górnej warstwie podłoża. Przepływ ciepła występuje zawsze w kierunku niższej temperatury.

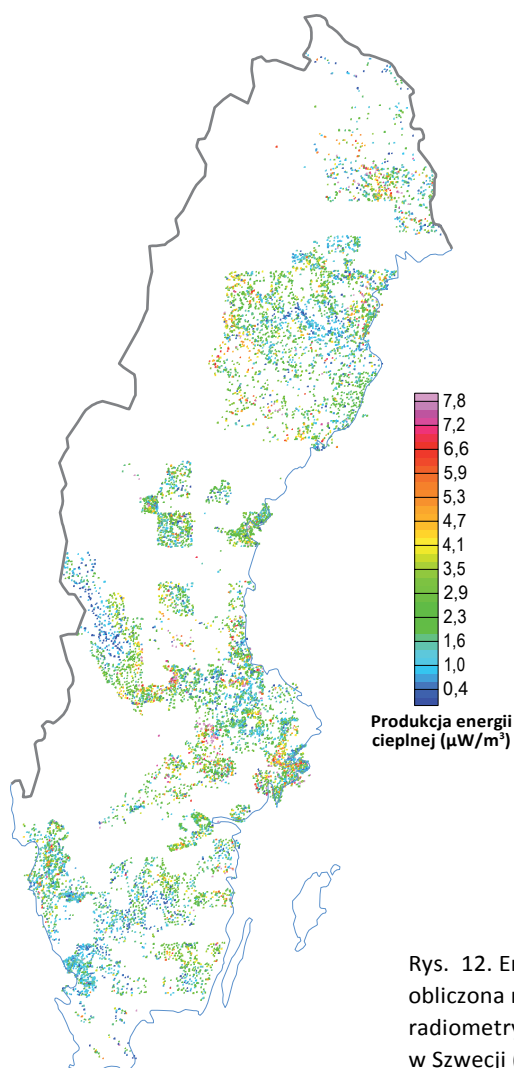


Rys. 11. **A.** Średnia roczna temperatura powietrza dla okresu 1961-1990 (źródło: SMHI). **B.** Mediana temperatury wody podziemnej w Szwecji dla okresu 1975-1995 (źródło danych SGU). Należy zauważyć, że średnia roczna temperatura powietrza od tamtego czasu wzrosła o około 1 °C. Temperatura w wodzie gruntowej także wzrosła.

Strumień ciepła z wnętrza ziemi dominuje na głębokości 20 m, temperatura gruntu nie jest już uzależniona od zmieniającej w ciągu roku temperatury otoczenia. Temperatura nawet na większych głębokościach może w pewnych warunkach geologicznych być pod wpływem oddziaływań (takich jak strumień wody podziemnej), a tym samym przepływ ciepła również będzie naruszony. W głębokich otworach wiertniczych silny strumień ciepła, wraz z wysoką temperaturą, są czynnikami decydującymi dla wysokiej wydajności energetycznej. W Szwecji, strumień ciepła na powierzchni ziemi, wynosi między 20 i 100 MW/m<sup>2</sup> (Eliasson i inni 1991), ze średnią wartością na poziomie około 50 mW/m<sup>2</sup>. Wartości te można porównać do średniej wartości 60 mW/m<sup>2</sup> w Europie Środkowej.

*Pojemność cieplna* jest określona przez ilość ciepła (obliczoną w Joule, J) potrzebną do podniesienia temperatury jednego kg (1 kg) materiału skalnego o 1 K (K). Innymi słowy, jest to miara ilości energii cieplnej, która może być przechowywana w materiale skalnym w celu osiągnięcia konkretnej zmiany temperatury. Pojemność cieplna liczona fizycznie w J/ kg · K. Pojemność cieplna jest zatem bezpośrednio związana z gęstością skały i często jest podawana jako wartość domyślna. Granit ma pojemność cieplną średnio 1 kJ/ kg · K, a woda ma 4 razy większą pojemność.





Rys. 12. Energia cieplna na powierzchni obliczona na podstawie danych radiometrycznych na odkrytych skałach w Szwecji (Schwarz i inni 2010).

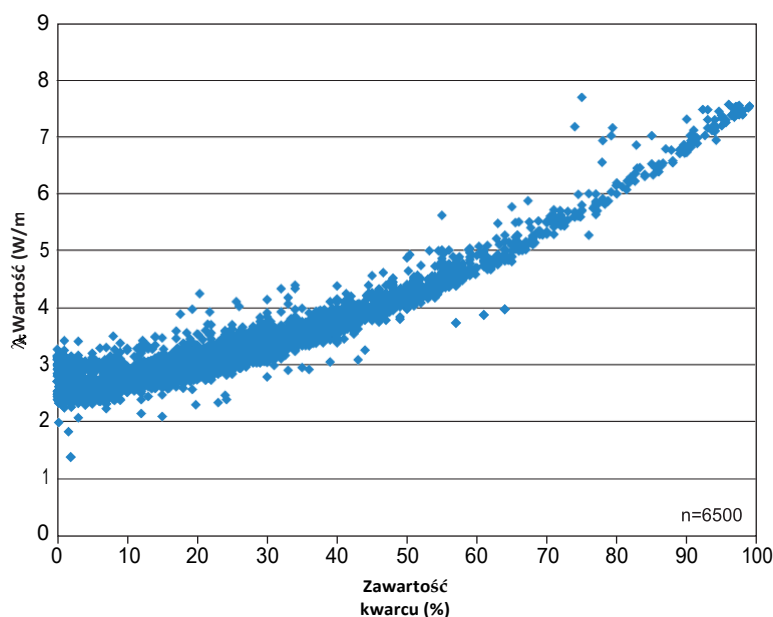
Wartość ta podkreśla znaczenie wody przy instalacjach geotermalnych.

W młodszych granitach i pegmatytach odnotowuje się podwyższone poziomy uranu, toru i potasu. W przypadku rozpadu radioaktywnego tych pierwiastków uwalniane jest ciepło. Chociaż wytwarzanie ciepła w formacji skalnej jest zwykle bardzo niskie (jedynie kilka  $\mu\text{W} / \text{M}^3$ ), prowadzi ono do nieco wyższych temperatur w podłożu skalnym, co z kolei zwiększa efektywność instalacji geotermalnej. Przy chłodzeniu należy wziąć pod uwagę odpowiednio wyższe temperatury skał. Stężenia wspomnianych pierwiastków są mierzone na podstawie pomiarów radiometrycznych prowadzonych w ramach geofizycznego mapowania SGU, na podstawie pomiarów ziemnych lub lotniczych. Dla niektórych obszarów Szwecji są dostępne informacje o energii cieplnej w podłożu skalnym (rys. 12).

### ***Pomiary i analiza właściwości termicznych***

Przewodzenie ciepła w danej skale może być obliczane teoretycznie przy użyciu informacji o ich składzie mineralnym (Horai i Baldrige 1972). Przewodność cieplna może być również zmierzona w laboratorium na próbkach skalnych lub w odwiercie.

Zdolność skały do przewodzenia ciepła (wartość mierzona w  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) może być obliczona według standardowych wartości dla minerałów w podłożu skalnym.



Rys. 13. Zależność między zawartością kwarcu a przewodnością cieplną (wartość  $\lambda$ ) dla różnych rodzajów skał z całej Szwecji, gdzie  $\lambda$  jest obliczane jako średnia geometryczna na podstawie rozkładu minerałów. Liczba próbek to 6500.

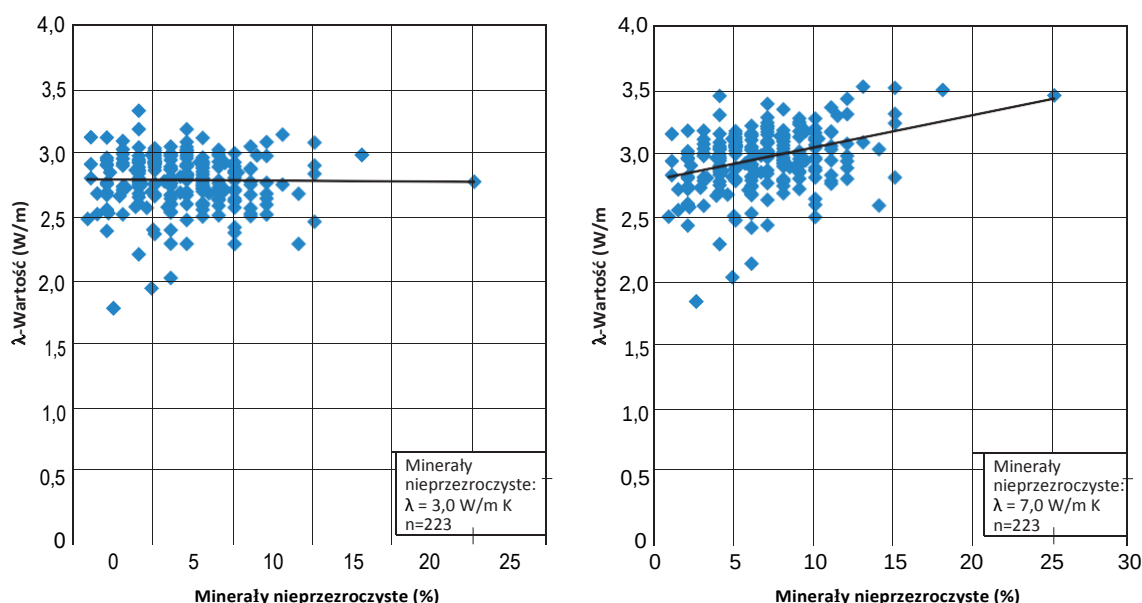
Wartości standardowe tych minerałów są podane w wielu publikacjach i normach (patrz tabela 1). Zasadniczo zawartość kwarcu w podłożu skalnym ma największy wpływ na wartość  $\lambda$  (Rys. 13). Kwarc ma dość wysoką  $\lambda$  wartość wynoszącą 7,7 W/m · K (Horai 1971), co oznacza na ogół, że skały bogate w kwarc mają dobre właściwości przewodzenia ciepła, a skały o niskiej zawartości kwarcu gorsze właściwości.

Użyte wartości  $\lambda$  w obliczeniach dla różnych minerałów skałotwórczych podano w tabeli 1. Niektóre grupy minerałów, takie jak minerały nieprzezroczyste (minerały nieprzezroczyste pod mikroskopem) nie różnią się w obliczeniach objętości wykonywanych za pomocą mikroskopu a analizą punktową na cienkich wycinkach.

Standardowa wartość 3,0 W/m · K została wykorzystana dla nieprzezroczystych minerałów (patrz Sundberg i inni 2008). Najczęściej występujące nieprzezroczyste minerały wykazują dużą zmienność wartości  $\lambda$ , przy czym na przykład magnetyt ma wartość  $\lambda$  równą 5,1 W/m · K (Horai 1971) a piry 19,2 W/m · K (Clauser i Huenges 1995). W większości przypadków są to podstawowe, ubogie w kwarc skały z wysoką zawartością minerałów nieprzezroczystych, takich jak diabazy. Zawartość jest zazwyczaj tylko kilkuprocentowa, co nie ma istotnego wpływu na przewodzenie ciepła skały. Na wykresie na rys. 14 przedstawiono wartości  $\lambda$  diabazów z całej Szwecji, gdzie standardową wartość = 3,0 W / m · K dla nieprzezroczystych minerałów porównano do innej przyjętej wartości standardowej = 7,0 W / m · K. Istnieje wyraźna różnica wartości  $\lambda$  gdy zawartość minerałów nieprzezroczystych przekracza 10 procent, ale w tym kontekście wartości muszą być także porównane z niewielką obecnością diabazu w podłożu skalnym w stosunku do innych skał.

Istnieją różne metody laboratoryjne służące do pomiaru przewodności cieplnej skał. Najbardziej znane metody to "divided bar", "needle probe", "hot disk transient plane source, TPS" i skanowanie optyczne. Wszystkie metody są odpowiednie do badania różnic w przewodności cieplnej skał. Wszystkie te metody wymagają różnych prac przygotowawczych, które mogą być bardzo rozległe, przed analizą próbek.

W SGU stosuje się metodę skanowania optycznego do pomiaru przewodności cieplnej i dyfuzji cieplnej w skałach. Metoda nazywa się TCS (Thermal Conductivity Scanning, Popov i inni 1999). W porównaniu do pozostałych wyżej wymienionych metod, TCS jest prosta, szybka i wystarczająco dokładna (biorąc pod uwagę błąd pomiaru mniejszy niż trzy procent), a także bardzo opłacalna.



Rys. 14.  $\lambda$ -zmiana wartości w odniesieniu do zawartości minerałów nieprzezroczystych w diabazach z całej Szwecji. Średnia - wartość  $\lambda$  dla nieprzezroczystego minerału 3,0 W / m · K na lewym i 7,0 W / m · K i na prawym wykresie.

Kolejną zaletą jest to, że metodą TCS można również mierzyć rdzenie. Teoretycznie obliczone wartości przewodzenia ciepła zostały sprawdzone i potwierdzone za pomocą pomiarów TCS. Było to możliwe, ponieważ SGU posiadało okazy do analizy, z tej samej próbki, z której pobrano cienkie odcinki. Przykładowe porównania między obliczonymi a pomierzonymi danymi przedstawiono poniżej w sekcji *mapy przewodzenia ciepła- rodzaje skał*.

Geofizyczne pomiary promieniowania gamma w odwiertach mogą być również stosowane do oceny i obliczenia przewodnictwa cieplnego w skale, szczególnie głębokich odwiertach. Sposób ten jest szczególnie odpowiedni dla skał osadowych, w których często występują warstwy o różnych właściwościach przewodnictwa cieplnego. Poprzez połączenie danych dotyczących promieni gamma i danych z dziennika gęstości, takich jak Soniclog (sonda akustyczna), można obliczyć przewodnictwo cieplne. Często wyniki muszą być kalibrowane z pojedynczymi analizami TCS lub innymi bezpośrednimi pomiarami rdzenia (patrz na przykład, Hartmann i inni 2005). Metoda opiera się na tym, że krzywa gamma daje pośrednie informacje o zawartości kwarcu w podłożu skalnym oraz że dziennik gęstości daje informacje o gęstości.

Pomiary przewodnictwa cieplnego w odwiertach mogą być przeprowadzane za pomocą tak zwanego testu TRT (test reakcji termicznej).

Pomiar jest głównie stosowany jako podstawa do projektowania i optymalizacji większych instalacji do ogrzewania i chłodzenia lub kontroli istniejących systemów (np. Raymond i inni 2011, Svenskt Geoenergicentrum 2015). Pomiar TRT przeprowadza się przez 2-3 dni w kontrolowanych warunkach. Odwiert dostarcza znaną ilość energii cieplnej przez kolektor a temperatura cieczy obiegowej jest mierzona w sposób ciągły, w ustalonych odstępach czasu na wlocie i wylocie kolektora (Gehlin 1998, 2002, Sanner i inni 2005). Wyniki są wykorzystywane do oceny reakcji termicznej odwiertu, obliczenia skutecznej przewodności cieplnej gruntu oraz odporności termicznej pomiędzy nośnikiem energii w kolektorze a ścianą otworu wiertniczego. Techniki pomiarowe światłowodowe, takie jak rozproszone badania reakcji termicznej (DTRT), znane również jako *enhanced Thermal Response Test* (eTRT) stosowane są przy dokładnych pomiarach temperatury w odwiertach i mapowaniu lokalnych zmian przewodności cieplnej w podłożu skalnym w kierunku pionowym.

Technologia DTRT umożliwia pomiar właściwości termicznych w odwiertach z dużą precyzją, a także zapewnia możliwość obserwowania przepływu wód gruntowych (Acuña 2013).

Nawet jeśli poszczególne odczyty przewodności cieplnej, mierzone metodą TCS, różnią się od pomiaru TRT w odwiercie, pomiary TCS dają cenne informacje o poszczególnych rodzajach skał i ich właściwościach termicznych. W obszarach skał krystalicznych przy stosunkowo jednorodnych warunkach, wyniki TCS i TRT są bardzo do siebie zbliżone. Na obszarach o warstwowych skałach osadowych, o bardzo różnej mineralogii i porowatości wartości poszczególnych pomiarów TCS różnią się od pomiarów TRT dla całego odwiertu. Jednak informacje o przewodności i dyfuzji cieplnej występujących skał zapewniają ważną podstawę do oceny oddziaływania ciepłego górotworu wokół odwiertu.

### **Warstwy gruntu**

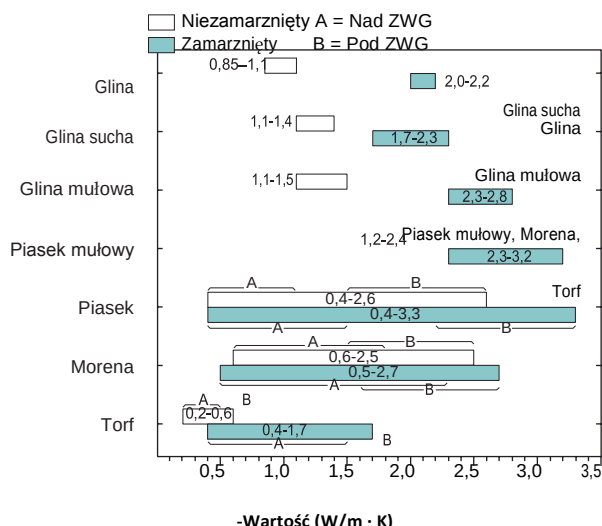
Warstwy gruntu w Szwecji powstały niemal całkowicie podczas ostatniego zlodowacenia. Łądolód zaczął się cofać się z południa kraju około 15 000 lat temu, a około 8000 lat temu praktycznie żadna część Szwecji nie znajdowała się już pod lodowcem. Gdy lód się cofnął, duża część Szwecji była pokryta wodą. Najwyższa linia brzegowa (NLB) wyznacza granicę między obszarami lądowymi powyżej i poniżej maksymalnego poziomu wody w związku z topnieniem lodowca. Obszary poniżej NLB zostały zalane przez Morze Północne lub przez Morze Bałtyckie o różnych wielkościach (na przemian z i bez połączenia z Morzem Północnym). Morena jest najstarszym i najczęściej występującym rodzajem gruntu w Szwecji, i zalega na ogół bezpośrednio na podłożu skalnym. Grunty morenowe zwykle składają się z materiału o ostrych krawędziach i są mieszaniną wszystkich frakcji ziaren od cząstek gliny do większych kamieni. W dużej części Szwecji dominują moreny z piasku i mułu. Morena jest dodatkowo gruntem, która dominuje na wysoko położonym partiach terenu.

Po stopieniu się lodowca wytworzyła się duża ilość wody, która przepływała przez lód w rzekach lodowcowych. Rzeki lodowcowe płynęły często w dolinach w podłożu skalnym. Płynąca woda w rzekach lodowcowych erodowała podłoże skalne, a materiał był transportowany i klasyfikowany przez ruchy wody aż do ostatecznego osadzenia w formie różnych rodzajów osadu w tunelach i przed krawędzią lodowca. Złóża po rzekach lodowcowych składają się głównie z piasku i żwiru. W tych miejscach występują dziś często znaczące warstwy wodonośne.

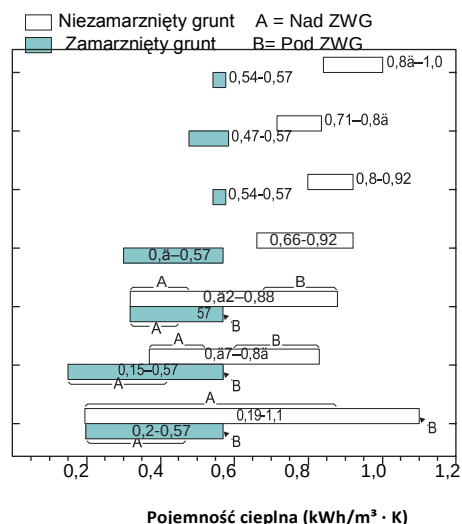
Po epoce lodowcowej, skorupa ziemska podniosła się. Warstwy gruntu uległy wpływowi erozji i fal. Moreny nad i poniżej najwyższej linii brzegowej są często całkowicie lub częściowo uwarstwione przez fale i prądy. Piasek i żwir osiadł na stokach poniżej najwyższej linii brzegowej. W niemal wszystkich regionach Szwecji występuje zjawisko wypiętrzenia.

W częściach krajobrazu, które były pokryte dużą ilością wody, w najgłębszych miejscach zalegają gliny i muły. Osady te składają się zarówno ze starszego osadu przeniesionego wraz z topniejącą wodą polodowcową oraz młodszych polodowcowych osadów zgromadzonych długo po cofnięciu się lodowca. Przez wypiętrzenie terenu, dna się wysuszyły, a w ich miejscu znajdują się teraz równiny błotniste. Obszary o gruntach gliniastych, drobnoziarnistych mają wysoką zdolność zatrzymywania wody i są to ważne grunty rolne.

Po stopieniu lodu, pojawiła się roślinność i nie było możliwości powstania organogenicznych gruntów takich jak torf czy gytia. Te grunty są najmłodszymi osadami, a w niektórych rejonach Szwecji są stosunkowo powszechne, szczególnie w obszarach, w których jeziora zarosły i utworzyły się mokradła i bagna. Nadal występuje zjawisko zmian warstw gruntu. Wzdłuż rzek i wybrzeży płynąca woda i fale powodują erozję gruntu.



Rys. 15. Przewodzenie ciepłe różnych rodzajów gruntów w stanie zamrożonym i nie zamrożonym. Dla gruntów przepuszczalnych podaje się zwykle zakres zmienności powyżej (a) i poniżej (b) zwierciadła wody podziemnej. (Zmodyfikowano na podstawie Rosén i inni 2001).



Rys. 16. Pojemność cieplna różnych rodzajów gruntów w stanie zamrożonym i nie zamrożonym. Dla gruntów przepuszczalnych podaje się zwykle zakres zmienności powyżej (a) i poniżej (b) zwierciadła wody gruntowej. Zmodyfikowano na podstawie Rosén i inni (2001).

### Termalne właściwości warstw gruntu

Przewodność cieplna w warstwach gruntu zależy głównie od ich wilgotności i porowatości. Duża zawartość wody powoduje większe przyleganie poszczególnych ziaren mineralnych i skalnych w gruncie, ponieważ woda przewodzi ciepło 20 razy lepiej niż powietrze. Gęstsze grunty z niewielką objętością porów wykazują lepszą przewodność cieplną, ponieważ powierzchnia styku ziaren minerałów i skał jest większa.

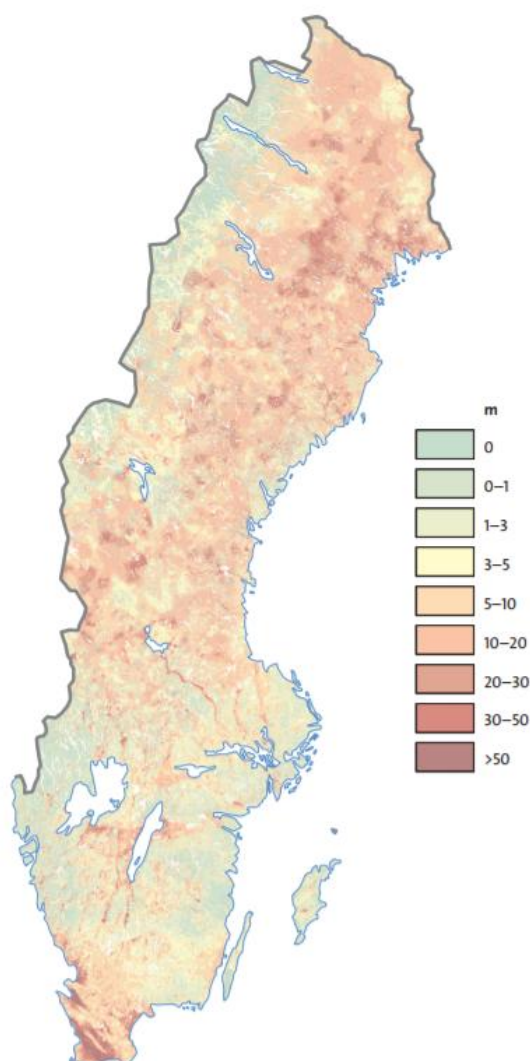
Zamrożony grunt zawiera wodę w postaci cieczy lub pary wodnej. Powstawanie lodu w gruncie zwiększa przewodność cieplną w porównaniu z niezamrożonym gruntem (fig. 15), ponieważ przewodność cieplna lodu jest cztery razy większa niż w wody. Jednocześnie jednak zmniejsza się pojemność cieplna gruntu, przez uwalnianie ciepła podczas zamarzania wody (Rys. 16). Zamrożenie szlamu wokół poziomych wymienników ciepła może w niektórych przypadkach prowadzić do uszkodzeń kolektora (Rosen i inni 2001).

Przewodność cieplna w warstwach gruntu jest wyższa poniżej zwierciadła wody podziemnej. Z reguły drobnoziarniste grunty (jak ły i gliny) lepiej wiążą wodę niż gruboziarniste grunty (jak piasek czy żwir), a zatem występują w nich najlepsze warunki temperaturowe dla poziomych wymienników ciepła. Grunty z wysoką zawartością mułu mogą zatrzymać dużo wody, nawet na dużej głębokości. Moreny zwykle mają dostatecznie wysoką zawartość ły i gliny, aby móc zatrzymywać wodę, ale w przypadku gruboziarnistych moren, zdolność do przechowywania wody jest porównywalna do piasku. Piasek pod zwierciadłem wody podziemnej może mieć wiele razy lepszą przewodność w porównaniu z piaskiem nad zwierciadłem wody.

### Miąższość warstwy gruntu

Miąższość warstwy gruntu jest bardzo zróżnicowana w Szwecji. W dolinach, wąwozach i poniżej linii brzegowej, oraz na obszarach ze skałami ulegającymi erozji, zwałowiska mogą przekraczać 100 m, ale zwykle miąższość warstw gruntu wynosi pomiędzy 5 i 20m (rys. 17). Miąższość warstwy gruntu ma przede wszystkim znaczenie ekonomiczne dla instalacji geotermicznych. Grunty o większej miąższości mogą mieć znaczenie dla projektowania, jeśli różnica w przewodności cieplnej między gruntem a podłożem skalnym jest duża.





**Rys. 17. Narodowa mapa głębokości podłoża gruntowego.**  
Wygenerowana komputerowo mapa głębokości podłoża gruntowego według metodyki opisanej przez Daniels & Thunholm (2014).

Instalacje geotermalne wykorzystujące poziome kolektory (fig. 3) wymagają pewnej głębokości gruntu (około 1m), aby móc wykorzystać energię w warstwach podłoża gruntowego. Wymagana głębokość zależy od budowy kolektora i warunków panujących na miejscu. Gdy powierzchnia gruntu jest ograniczona, kolektory mogą być umieszczone na różnych poziomach.

Informacja o miąższości warstw gruntu jest bardzo pożądana, szczególnie w przypadku odwiertów geotermicznych, ponieważ znaczną część całkowitych kosztów wiercenia stanowi wiercenie z układaniem rur okładzinowych. Głębokość i struktura gruntu zależą od wielu geologicznych czynników, które mogą znacznie różnić się zarówno w skali lokalnej i regionalnej. Wpływ ostatniego zlodowacenia na krajobraz i odkładanie się osadów, szczególnie w związku z topnieniem lodu jest ważnym czynnikiem. Innym ważnym parametrem jest struktura podłoża skalnego. W obszarach prekambryjskiego, krystalicznego podłoża skalnego często spotyka się największe głębokości gruntu przylegające do stref pęknięć i uskoku, a także stref wietrzenia. Na obszarach ze skałami osadowymi, grubość warstwy gruntu jest wyraźnie związana ze stopniem konsolidacji skał. Na przykład, w Skanii są obszary z luźnymi skałami osadowymi, które w wielu przypadkach mają podobną strukturę jak warstwy gruntu, co znaczy, że rury okładzinowej muszą być ułożone zarówno w gruncie jak i do pewnej głębokości w skale.

SGU pobiera informacje o grubości warstwy gruntu z archiwum studni SGU. W archiwum znajdują się dane dotyczące głębokości gruntu do podłoża skalnego. Ilość danych o odwiertach w archiwum różni się znacznie w zależności od regionu. W Skanii są informacje z ponad 30.000 odwiertów.

W ostatnich latach, SGU opracowała ogólnokrajowy model głębokości gruntu (rys. 17), który w dużej mierze opiera się na danych z archiwum studni, ale również informacjach z baz danych (skały i parametry hydrogeologiczne). Ta ostatnia zawiera informacje o głębokości i grubości warstw gruntu z odwiertów i badań geofizycznych (sejsmika refrakcyjna i georadar). Ponieważ nie istnieje wyraźna korelacja pomiędzy grubością warstwy gruntu a rodzajem gruntu, model głębokości gruntu uwzględnia również strukturę warstw gruntu i sposób formowania. Daniels & Thunholm (2014) prezentuje w raporcie SGU jak został stworzony ogólnokrajowy model oraz jak wylicza się miąższość warstw gruntu z danych zawartych w modelu. Niepewność w modelu zależy od ilości zapisanych danych. Na obszarach o jednorodnym podłożu skalnym, model ma wysoką niezawodność mimo dość ubogiego zbioru danych, podczas gdy na złożonych geologicznie obszarach wymagana jest znacznie większa baza danych dla uzyskania wiarygodnego wyniku. Niezawodność i niepewność modelu są opisane bardziej szczegółowo przez Daniels i Thunholm (2014).

Niektóre znane zjawiska geologiczne, takie jak środkowo-szwedzka strefa krawędzi lodowca, rozciągająca się ze wschodu na zachód o dużej głębokości gruntu (Östergötland, Västergötland i Dalsland). Wiele złóż po rzekach lodowcowych ukierunkowanych północ-południe, przechodzących przez Mälaren jest wyraźnie widoczna jako połacie o stosunkowo dużej głębokości podłoża gruntowego (patrz Rys. 17).

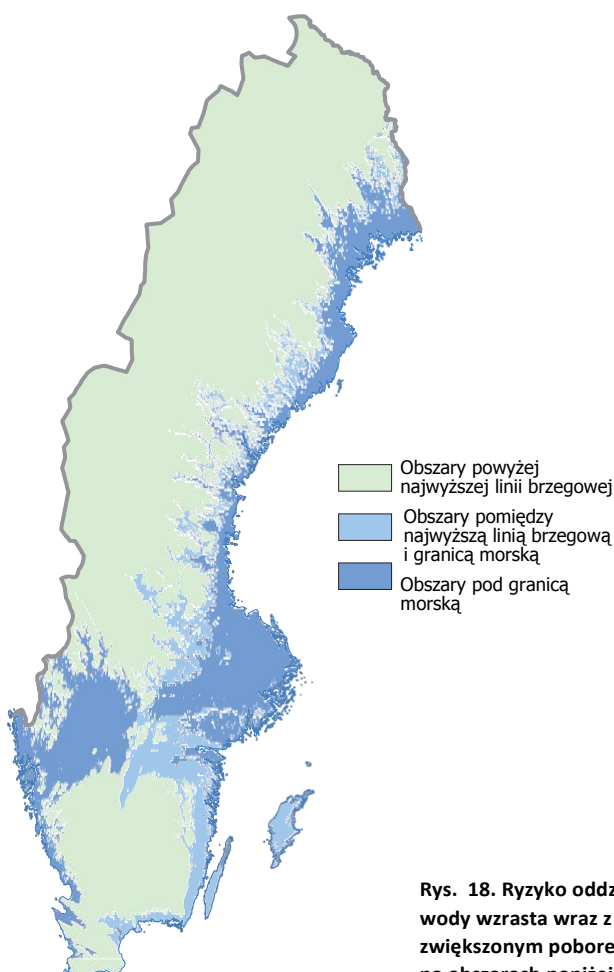
Wzdłuż zachodniego wybrzeża jest wiele dolin szczelinowych z glinami i dużą głębokością podłoża gruntowego, otoczonych głównie skalistym podłożem. Obszary, w których można się spodziewać większej głębokości podłoża gruntowego to doliny szczelinowe, takie jak rzeka Gota, dolina Klarälv i kilka rzek w Norrlandii oraz obszary polodowcowych dolin. Największa znana głębokość gruntu w Szwecji wynosi prawie 200 m i znajduje się w samym centrum Jönköping. W obszarach z gliniastym gruntem, miąższość wynosi najczęściej od 5 do 20 m. Warstwy gliny o miąższości do 100m występują w obszarze Göteborga i Uppsali.

Obszary, w których podłoże skalne jest odkryte lub przykryte jedynie cienką warstwą gruntu są powszechne w Szwecji. Cienkie warstwy gruntu występuje na przykład w Götaland, południowej części Svealand, natomiast większe głębokości gruntu dominują w Norrlandii. Różnice te można wyjaśnić zarówno dynamiką, jak i zdolnością lodowca do erodowania i transportu materiałów z podłoża.

## **Woda podziemna**

Wszystkie wody podziemne pochodzą z opadów atmosferycznych, które przedostały się do gruntu lub z tzw. zasilania bocznego (np. z rzek, jezior, itp.). Woda przemieszcza się w ośrodku skalnym z wyższego do niższego poziomu, żeby na końcu wypłynąć m.in. poprzez źródła do rzek, jezior i mórz. Decydujące znaczenie dla przepływu wody ma objętość porów i przepuszczalność podłoża skalnego. W ośrodku skalnym wody występują najczęściej w porach, czyli przestrzeni pomiędzy poszczególnymi ziarnami. Generalnie luźne skały gruboziarniste, takie jak piasek czy żwir zawierają duże ilości wody, w przeciwieństwie do bardziej drobnoziarnistych, jak ły czy gliny. Moreny, która są najczęściej występującym rodzajem podłoża w Szwecji, mają bardzo zróżnicowaną objętość porów, co prowadzi także do różnej zawartości wody.

W prekambryjskim krystalicznym podłożu skalnym woda podziemna występuje głównie w szczelinach. Dostępność wody zależy od układu, wielkości i rozwarcia szczelin w skałach, ponieważ przepływ wody następuje wzdłuż poszczególnych pęknięć. W porowatych skałach, takich jak piaskowiec, transport wody może odbywać się za pośrednictwem porów skalnych. Powoduje to, że dostępność wody w tych skałach jest znacznie większa niż w przypadku skał krystalicznych.

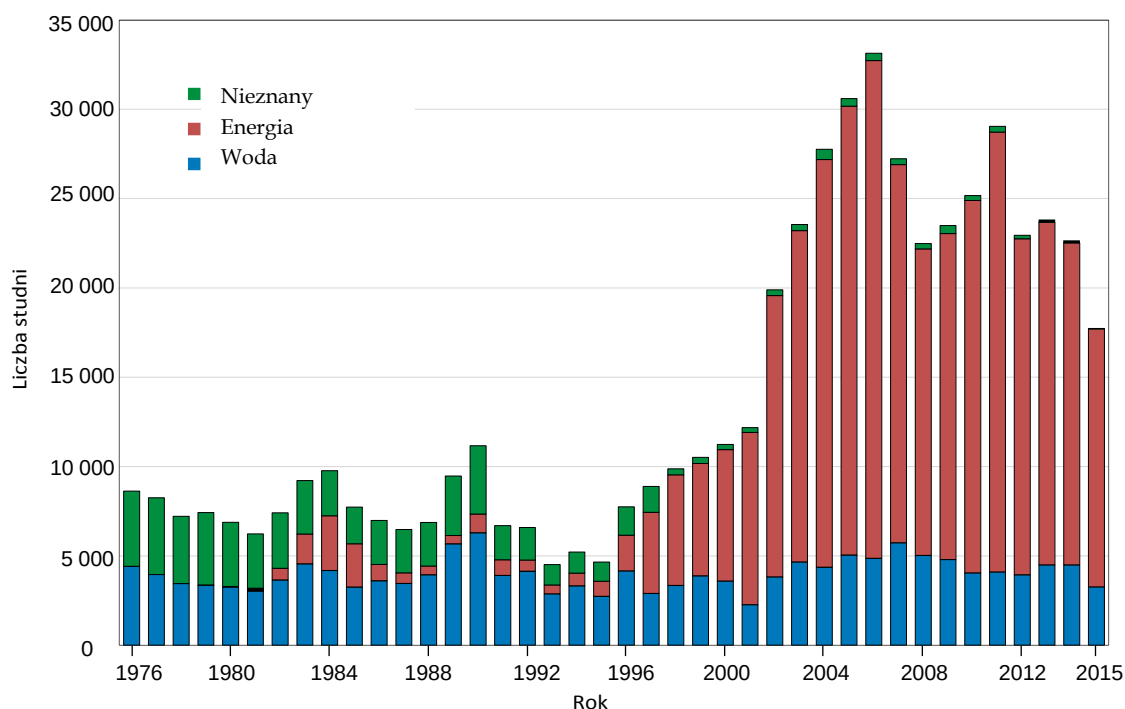


**Rys. 18. Ryzyko oddziaływania słonej wody wzrasta wraz z głębokością i zwiększonym poborem wody, zwłaszcza na obszarach poniżej granicy morskiej.**

Jakość wód często różni się między podłożem skalnym a gruntem. Ogólnie rzecz biorąc, im głębiej (podłoże skalne), tym lepiej chronione są wody podziemne przed zanieczyszczeniami pochodzącymi z rolnictwa, ścieków etc. Wynika to z faktu, że głębiej występujące wody podziemne miały dłuższy czas na zneutralizowanie zanieczyszczeń, a także są lepiej izolowane od powierzchni. Z drugiej strony, płytkie studnie kopane mają zazwyczaj niższy poziom „zanieczyszczeń geogenicznych”, takich jak metali, radonu, soli itp. pochodzących z rozpuszczania minerałów z podłoża skalnego. Obecność słonej wody podziemnej jest bardzo zróżnicowana, ale najczęściej występuje w obszarach przybrzeżnych i nisko położonych, zwłaszcza w studniach o głębokości większej niż 150 m (rys. 18).

W przypadku średnotemperaturowej geotermii, wykorzystującej wody podziemne, interesujące są głównie obszary o bardzo dobrych warunkach do eksploatacji wód podziemnych. W magazynach energii cieplnej w warstwach wodonośnych (ATES, rys. 4), ważne jest, żeby magazyn miał dostateczną objętość, aby można było okresowo przemieścić zmagazynowaną wodę ze strony „gorącej” na „zimną” i vice versa, bez ryzyka zalania albo wyschnięcia magazynu lub hydraulicznego połączenia gorącej i zimnej strony.

W przypadku energii geotermalnej, jakość wody nie jest tak samo istotna jak dla studni do poboru wody pitnej, ale należy wziąć pod uwagę jakość wody podczas instalowania systemu geotermalnego. Odwierty energii geotermalnej, które sięgają do głębszych warstw z zasoloną wodą podziemną, mogą wpływać na pobliskie studnie wody pitnej, które same nie sięgają do zasolonej wody podziemnej.



Rys. 19. Łączna liczba odwiertów (nie wliczając odwiertów, których miejsce nie jest znane) w archiwum SGU (zarejestrowane do roku 2015).

Ryzyko występowania zasolonych wód podziemnych wymaga ciągłych pomiarów zasolenia (lub przewodzenia) podczas wiercenia odwiertów. W takim przypadku, część odwiertu, w której napotkano na zasoloną wodę podziemną, należy uszczelnić lub zatkać, aby zminimalizować wpływ zasolonej wody na studnie wydobywające wodę pitną.

Instalacje geotermalne, wykorzystujące wody termalne, które są dotknięte podwyższonym poziomem chloru mogą mieć problemy związane z korozją w wymienniku ciepła. W systemach geotermalnych z wykorzystaniem warstw wodonośnych, wysokie stężenia żelaza i manganu mogą być problematyczne. Żelazo i mangan mogą wytrącać się wewnątrz studni zrzutu, co powoduje stopniowe zmniejszenie ich pojemności. W warstwach wodonośnych, gdzie studnie używane są naprzemiennie, ryzyko zatkania zmniejsza się ze względu na naprzemienny przepływ.

### **Archiwum studni**

W archiwum SGU znajdują się informacje o ponad 600.000 studni (luty 2016). Archiwum zawiera dane, w tym projekt techniczny, głębokość, pojemność wody, zwierciadła wód podziemnych, lokalizację geograficzną i strukturę gruntu. Informacje zawarte w archiwum dotyczą głównie wierconych studni głębinowych. Informacje są wysyłane do SGU przez firmy wiertnicze od 1976 roku na podstawie ustawy o obowiązku informacyjnym (SFS 1975: 424, SFS 1985: 245). Baza danych jest rozszerzana o 25 000 danych rocznie, z czego 4000 to studnie wody pitnej (Rys. 19).

Informacje zawarte w archiwum studni i odwiertów SGU są podstawą do oceny możliwości wykonania kolejnych odwiertów i studni na danym obszarze. Wiedza na temat głębokości i rodzaju podłoża gruntowego i zwierciadła wody podziemnej z pobliskich studni dostarcza cennych informacji dla odpowiedniego doboru projektu i wykonania odwiertu, a także pozwala na bardziej wiarygodną ocenę głębokości i kosztów. Obecnie istnieje także archiwum cyfrowe na stronie SGU. Informacje są również dostępne na aplikacji mobilnej (zobacz Mapa geo na stronie internetowej SGU [www.sgu.se](http://www.sgu.se)). Baza danych podziemnych źródeł wód jest również udostępniona przez SGU. To samo dotyczy cyfrowego archiwum raportów na temat warunków wód podziemnych.

### **Mapy hydrogeologiczne**

Od 1970 roku SGU tworzy w Szwecji mapy zasobów wód podziemnych. Tworzenie map opiera się na lokalizowaniu występowania i kierunkach przepływu. Informacje przedstawione są na mapach hydrogeologicznych w skali regionalnej (1: 250 000) lub na szczegółowych mapach krajowych w skali 1:50 000. Mapy powiatowe są oparte na kompilacji istniejących informacji, takich jak mapy pojemności wodnej w wierconych studniach. Szczegółowe mapy (zarówno lokalne jak i mapy poziomu zwierciadła wody podziemnej) obejmują głównie warstwy wodonośne w złożach piasku i żwiru. W przeciwieństwie do map regionalnych, szczegółowe mapy bazują w całości na wewnętrznych badaniach SGU, aby lepiej móc ustalić przepływy wód podziemnych i zakres warstw wodonośnych. Mapy są oparte na wynikach różnych badań geofizycznych (sejsmicznych, georadarach i VLF (*Very Low Frequency*)), badań odwiertów i poziomu zwierciadła wody podziemnej, a także na chemicznej analizie wody z istniejących odwiertów.

W przypadku energii geotermalnej, najbardziej przydatne są mapy hydrogeologiczne do identyfikacji obszarów z warstwami wodonośnymi o konkretnych warunkach. Mapy zawierają również informacje niezbędne dla oceny prądów wód podziemnych oraz przepływu wody, zarówno w podłożu skalnym i gruntowym, co może dać więcej informacji do oceny możliwego poboru mocy.

### **Obszary ochronne wód**

Jakość wody w sieci wodociągowej jest jednym z najważniejszych zasobów naturalnych Szwecji. Aby zapewnić ochronę tego zasobu wymagane jest minimalizowanie ryzyka zanieczyszczenia. Należy unikać bezpośrednich lub pośrednich czynników ryzyka, które mogą mieć negatywny wpływ na jakość i ilość wód.

W związku z publicznymi punktami zaopatrzenia w wodę w Szwecji, gminy i powiaty mają możliwość wyznaczenia obszarów ochrony w celu regulacji oraz ochrony wód. Nawet obszary, które nie są jeszcze wykorzystywane do zaopatrzenia w wodę, mogą być określone jako obszary ochrony wód.

Budowa instalacji geotermalnej jest często regulowana w przepisach dot. obszarów wód chronionych. Normalnie instalacje są zakazane w pierwszej strefie ochrony, podczas gdy w drugiej strefie ochrony trzeba uzyskać pozwolenie. Na obszarach, w których występuje trzecia strefa ochrony, odwierty podlegają regulacjom tylko w wyjątkowych sytuacjach. Pewne ograniczenia dotyczące prac ziemnych w trzeciej strefie, mogą występować w pobliżu punktów wyjściowych publicznej sieci wodociągowej lub w miejscach występowania głębokich warstw gliny.

SGU jest organem doradczym w związku z wydawaniem pozwoleń na instalacje geotermalne w strefach ochrony wód. SGU ocenia następujące kwestie:

- Ryzyko związane z fazą budowy, obejmującą wiercenie i wykop.
- Oddziaływanie instalacji na warunki geologiczne oraz ryzyko związane z eksploatacją.

Ryzyko ogranicza się do okresu wykonywania pracy i wiąże się głównie z ryzykiem wycieku płynów znajdujących się w urządzeniach wiertniczych (oleje, rozpuszczalniki, smary, itp.). Problemy te występują przy wszystkich typach prac ziemnych i nie są specyficzne dla wiercenia. Odpowiednie gospodarowanie zwiercinami, błotem i gruzem oraz ryzyko uszkodzenia podłoża to kolejne kwestie, które warto ująć w ocenie.

System geotermalny może mieć różny wpływ na warunki geologiczne. Instalacja oparta na poziomych kolektorach cieplnych może powodować zmianę warunków infiltracji, ze względu na zakłócenie naturalnych warunków gruntowych.



W szczególności na obszarach ze skałami osadowymi, zagrożonych oddziaływaniem słonej wody, mieszanie się wód z różnych warstw może mieć negatywny wpływ na jej jakość. Efekty mogą być stałe, a ich zakres zależy głównie od konstrukcji instalacji.

Podczas normalnej pracy instalacji geotermalnej, wyciek płynów z rur kolektora jest największym czynnikiem ryzyka skażenia gruntu i wód podziemnych. Dla systemów magazynowania ciepła w warstwach wodonośnych, głównym czynnikiem ryzyka jest lokalna zmiana chemiczna wody podziemnej, zmiana temperatury i strumieni w warstwach wodonośnych.

Według SGU, ryzyko oddziaływania instalacji geotermalnej na źródło wody jest silnie związane z lokalnymi warunkami geologicznymi i hydrogeologicznymi oraz wydajnością i projektem obiektu. Dlatego trudno jest dać ogólne porady i wytyczne w sprawie warunków dot. wykonywania obiektów w zakresie ochrony wód. Ostateczna decyzja w sprawie pozwolenia na wykonanie instalacji geotermalnej musi być podjęta po ocenie warunków lokalnych i opierać się na określonych czynnikach ryzyka opisanych powyżej. Jeżeli organ stwierdzi, że lokalne odwierty geotermiczne mogą być dozwolone w obrębie strefy ochronnej, prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożeń może być minimalizowane przez dodatkowe wymogi. Może to być na przykład wymaganie dotyczące szczelnego podkładu pod urządzenia wiertnicze i sprężarki, wypełnienia odwiertu materiałem uszczelniającym, zapewnienia, że prace odbywają się zgodnie z normą SGU Normbrunn i przez wykwalifikowany personel.

Potencjalne ryzyko dla wód podziemnych na obszarach ochronnych wzrasta wraz ze wzrostem liczby obiektów. Wszystkie prace ziemne pociągają za sobą pewne ryzyko negatywnego oddziaływania na wody podziemne. Dla pojedynczych inwestycji ryzyko jest jak najbardziej do opanowania, ale zwiększa się wraz ze wzrostem liczby zamówień, pomimo faktu, że normy w zakresie projektowania i wykonawstwa są przestrzegane. Liczba możliwych obiektów w obrębie ochrony wód musi być zatem regulowana w oparciu o panujące warunki, np. warunki geologiczne i hydrogeologiczne, głębokość wiercenia, odstęp między odwiertami, wpływ temperatury, aktywne i pasywne systemy etc.

W odpowiedziach które SGU udzieliło w sprawie instalacji geotermalnych można zauważyć, że w przypadku obiektów planowanych w obrębie pierwszej strefy ochronnej, we wszystkich przypadkach, oprócz jednego, SGU nie wyraziło zgody na wykonanie odwiertów. W odpowiedziach dotyczących obiektów planowanych w obrębie drugiej strefy ochronnej, SGU zatwierdziło wykonanie odwiertów, jednak często z wymaganiami mającymi na celu zmniejszenie ryzyka ewentualnego wpływu na źródła wody, takimi jak np. ponowne zasypanie odwiertu. Bardzo ważne jest, że istnieją wyraźne opisy i granice obszarów chronionych, ponieważ jest to niezbędne dla prawidłowej oceny przy wydawaniu pozwoleń. Starsze i niedokładne granice i regulacje mogą prowadzić do niepotrzebnej ochrony niektórych obszarów lub braku regulacji na terenach które powinny być objęte ochroną.

### **Zanieczyszczony grunt**

Przed wierceniem i pracami ziemnymi na terenach, gdzie istnieje podejrzenie zanieczyszczenia gruntu, należy zdobyć niezbędną wiedzę na temat rozprzestrzenienia się zanieczyszczeń.

Odwiert powinien być umieszczony i wykonany tak, żeby nie powodował rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. W systemie zamkniętym nie czerpie się wody, co zmniejsza ryzyko zanieczyszczenia. Należy jednak pamiętać, że wiercenie jednego lub kilku odwiertów w podłożu skalnym może prowadzić do rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia znajdującego się w górnych warstwach gruntu.

W trakcie lub po zakończeniu wiercenia, zanieczyszczenia mogą przedostać się do szczelin, które tworzą kanały hydrauliczne ze szczelinami wodonośnymi.

Zasypanie odwiertu materiałem uszczelniającym może znacząco zapobiec rozprzestrzenianiu się ewentualnych zanieczyszczeń.

Gdy istnieje ryzyko rozprzestrzenienia się zanieczyszczeń, ważne jest uszczelnienie rur okładzinowych. Pozwoli to uniknąć, że jakiekolwiek zanieczyszczenia przedostaną się do głębiej zalegających wód gruntowych. W przyszłym, zaktualizowanym wydaniu normy Normbrunn będą znajdować się doprecyzowane zalecenia dotyczące wiercenia na zanieczyszczonych obszarach. Podczas wykonywania odwiertu badawczego należy sprawdzić, czy nie występują powierzchniowe szczeliny wodonośne i na podstawie tych informacji należy dostosować długość rur okładzinowych dla pozostałych odwiertów. W kilku krajach prowadzone są próby łączenia rekultywacji gruntu i wód podziemnych z energią geotermalną. Jednym z przykładów jest miasto Utrecht w Holandii, w którym stworzono tak zwaną „*bio-washing machine*”, w której oczyszcza się wody podziemnej z lotnych związków organicznych (VOC) przez połączenie magazynów warstw wodonośnych i biodegradacji. To rozwiązanie zapewnia dobre efekty synergii. Równocześnie z oczyszczaniem wody podziemnej pozyskiwana jest także energia z systemu, co pozwala na szybkie spłacenie inwestycji i mniejszy wpływ na emisję dwutlenku węgla w mieście za pomocą magazynowania energii. Aby uzyskać więcej informacji, odwiedź stronę <http://rwsenvironment.eu/subjects/soil/projects/citychlor/>.

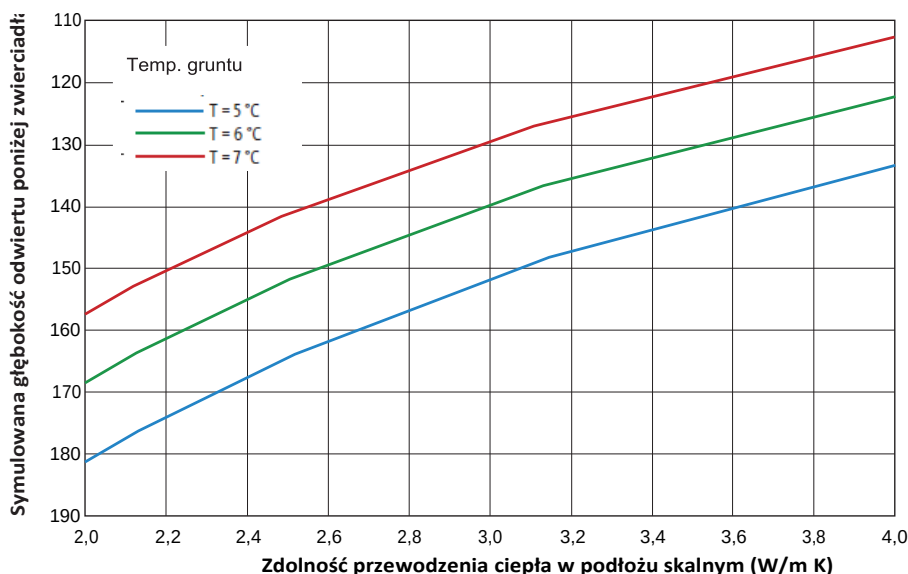
## **WPŁYW GEOLOGICZNYCH I GEOGRAFICZNYCH CZYNNIKÓW NA SYSTEMY GEOTERMALNE**

### ***Przewodnictwo cieplne***

Przy doborze instalacji geotermicznej powszechnie stosowane są programy do obliczeń. W wielu miejscach w Szwecji, wartość przewodzenia ciepła w skale i gruncie jest przyjmowana według przyjętych standardów. Wartości standardowe są bezpieczne i zapewniają w większości przypadków zadowalającą podstawę do projektowania poszczególnych obiektów. Lokalne odstępstwa geologiczne i hydrogeologiczne mogą wpłynąć na indywidualny projekt systemu. Dlatego tak ważny jest dostęp do informacji. Specjalista wykonujący odwiert powinien być świadomy w jaki sposób lokalne warunki geologiczne mogą oddziaływać na system.

Dobra znajomość właściwości termicznych w podłożu skalnym ma ogromne znaczenie w miejscach planowania większych systemów z wieloma odwiertami. Dlatego konstrukcja dużych systemów jest poprzedzana odwiertem badawczym i sporządzeniem dokumentacji geologicznej oraz badaniami nad właściwościami termicznymi, na przykład za pomocą TRT lub DTRT. Te stosunkowo rozległe badania nie są opłacalne dla pojedynczej instalacji geotermalnej. Pojedyncze instalacje mogą pośrednio uzyskać podstawowe informacje do oceny wymaganej głębokości, np. z informacji o przewodności cieplnej w podłożu skalnym, strukturze skał oraz innych warunków geologicznych (np. wód podziemnych, warstw gruntu).

Przy projektowaniu instalacji decydującym czynnikiem jest temperatura podłoża skalnego, przewodność cieplna i przepływ wody. Temperaturę podłoża skalnego w Szwecji można w uproszczony sposób odczytać z mapy przedstawiającej temperaturę wody podziemnej (rys. 11B). W południowej Szwecji, temperatura ta może też być uznana za średnią roczną temperaturę zewnętrzną (rys. 11A). Należy zauważyć, że obie te temperatury różnią się w południowej Norrlandii i bardziej na północ o 1 - 4°C. Chociaż możliwe są także lokalne odchylenia, które powinny być brane pod uwagę (np. osiągnięcie większej wydajności grzewczej w podłożu skalnym (patrz rys. 12)). W celu dokonania oceny przepływu wody w skale i położenia zwierciadła wody podziemnej, pomocne mogą okazać się informacje z istniejących baz danych i archiwum SGU. Może jednak okazać się, że dalsze badania będą niezbędne. Dzięki odpowiedniej wiedzy na temat lokalnych warunków geologicznych i termicznych, możliwa jest optymalizacja instalacji. Wymagana głębokość odwiertu, w celu osiągnięcia żądanej mocy, może różnić się aż o 40 procent (rys. 20).



Rys. 20. Symulowana głębokość odwiertu w stosunku do przewodności cieplnej i temperatury w podłożu skalnym (5-7 ° C) na głębokości 100 m, przy projektowanej mocy 25 MWh do ogrzania domu jednorodzinnego (o Kalskin Ramstad i inni 2008). Symulacja energetyczna w programie *Earth Energy Designer* (EED). Warunki gruntowe: Sezonowa sprawność pompy ciepła = 3,3. Średnica odwiertu = 140mm

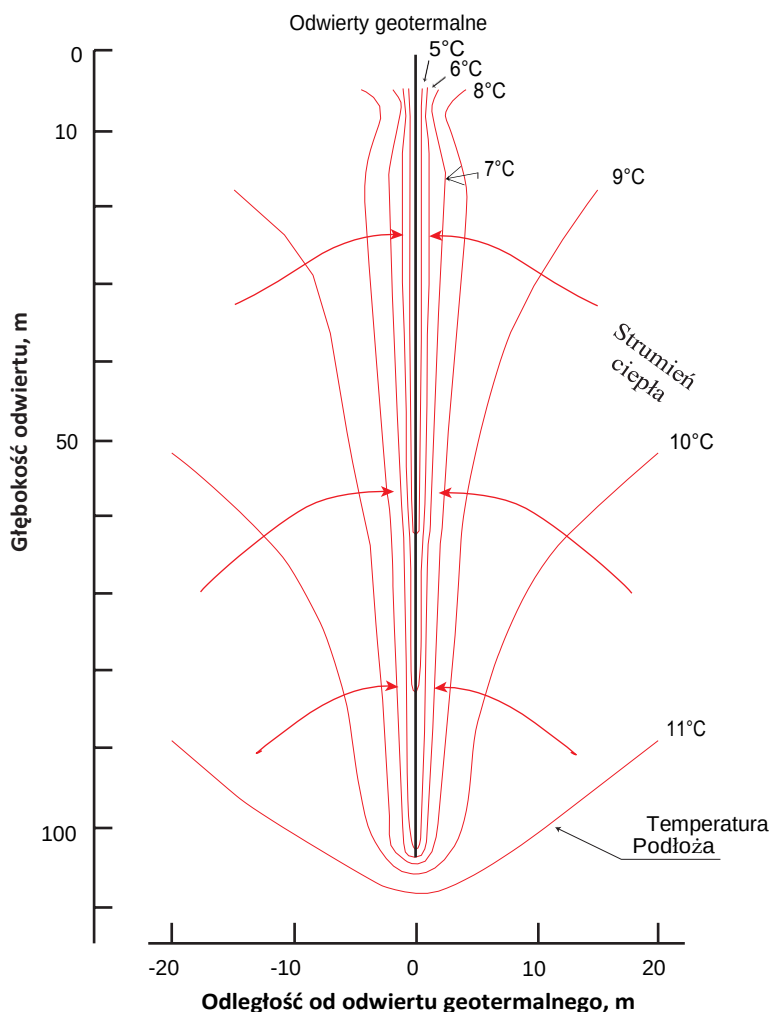
### Oddziaływania termiczne

Prawidłowe projektowanie systemu geotermalnego ma kluczowe znaczenie dla jego pracy z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Instalacja może być eksploatowana jedynie w sposób zrównoważony, tak żeby nie pobierała więcej energii z podłoża skalnego niż oddaje, w perspektywie rocznej. Fizycznie, nie ma znaczenia skąd pochodzi energia, dotyczy to zarówno pasywnych, jak i aktywnych systemów geotermalnych. Z energetycznego punktu widzenia, zrównoważony system mógłby zostać eksploatowany w trakcie kilkudziesięciu do kilkuset lat. W praktyce jednak dozwolony jest mniejszy spadek temperatury w okolicy odwiertu przez pierwsze kilka lat eksploatacji. W dalszej perspektywie, temperatura spada znacznie wolniej w sposób bardziej asymptotyczny. Pole temperatury stabilizuje się stopniowo, a stan może być opisany jako stacjonarny (np. Rybach 2012).

Pole temperatury wokół odwiertu do poboru energii cieplnej jest w formie lejka o dużym gradiencie temperatury. Rys. 21 przedstawia zmierzone warunki temperaturowe w okresie zimowym w pobliżu odwiertu geotermalnego w Elgg / Szwajcaria. W tym przypadku, jest to rocznie około 13 MWh pobieranej energii cieplnej, która jest w równowadze z ponownym ładowaniem (Rybach i Eugster 2002). Duży gradient temperatury pozwala na wysoki promieniowy przepływ ciepła w granicach 3 W / m<sup>2</sup> w okolicy otworu. Ten strumień ciepła jest 50 razy większy niż normalny naziemny strumień ciepła. Podobne obserwacje temperatury zostały dokonane przez Rybach & Sanner (1999) wokół odwiertu geotermalnego w Taunus / Niemcy, gdzie temperatura została zarejestrowana w 100 punktach w podłożu skalnym.

Gwałtownie rosnące zapotrzebowanie na energię geotermalną doprowadziło do stosunkowo gęstego rozmieszczenia instalacji na niektórych obszarach. Jednocześnie unowocześniono instalacje i zwiększono ich moc. W niektórych przypadkach, obiekty mogą oddziaływać na siebie termicznie, jeśli są położone zbyt blisko. W pewnych warunkach, nawet naturalny przepływ wody podziemnej może zostać naruszony.

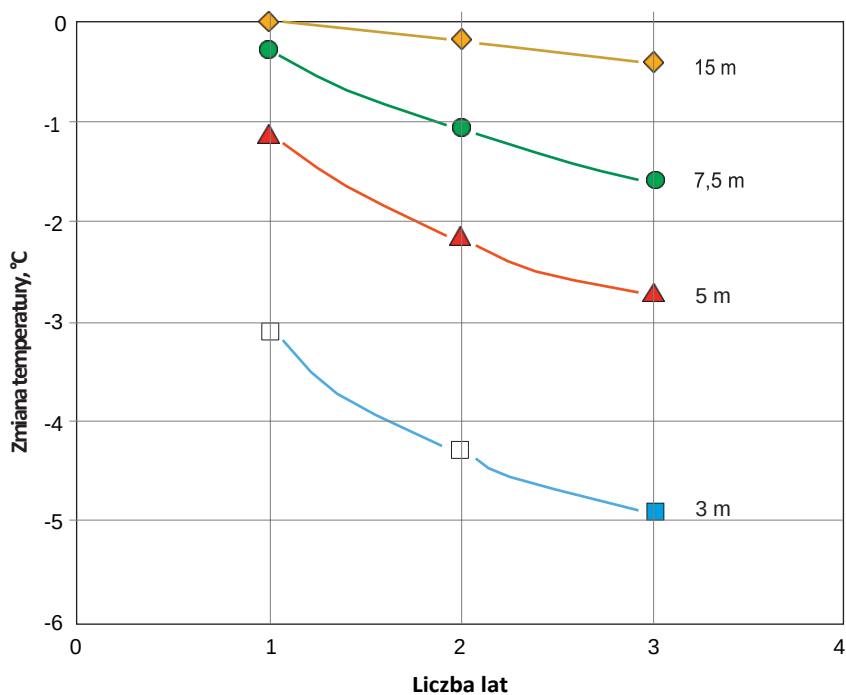
Dla pojedynczych odwiertów geotermalnych, zalecana odległość wynosi w Szwecji 20 m. W instalacjach, w których większa ilość odwiertów współdziała (BTE), a ciepło jest aktywnie oddawane w okresie letnim, odległość pomiędzy otworami wynosi zwykle 5-8 m.



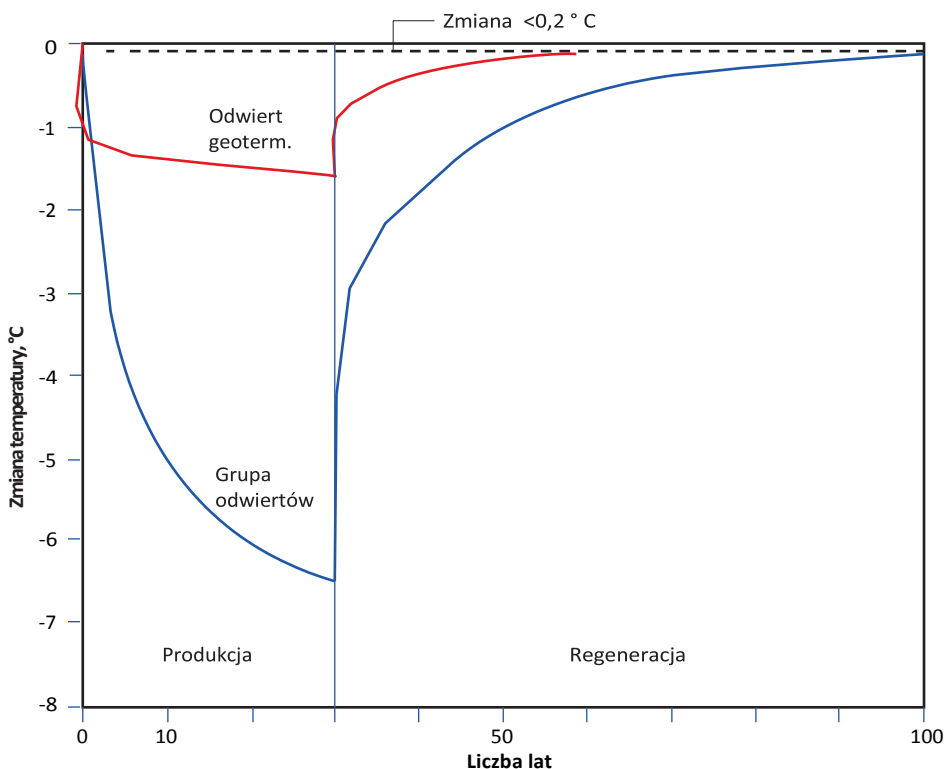
Rys. 21. Rozkład temperatury (izotermy) wokół 105m głębokiego odwiertu Elgg (Szwajcaria), w przeliczeniu na najzimniejszy okres w roku 1997 i skalibrowany z wartościami pomiarowymi. Rozproszenie ciepła w podłożu skalnym ma kształt cylindryczny, z promieniowym przepływem ciepła na poziomie ok  $3 \text{ W/m}^2$ .  
Zmodyfikowano na podstawie Eugster (2001) i Rybach & Eugster (2002).

Signorelli (2004) porównał temperaturę cieczy nośnika ciepła na wylocie kolektora w pojedynczym odwiercie z grupą sześciu otworów w ciągu trzech lat (rys. 22). Otwory mają głębokość 100 m i nie są aktywnie ładowane. Przewodność cieplną w skale przyjmuje się na poziomie  $2,46 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . W odległości 15 m od odwiertów geotermalnych różnica temperatur w porównaniu do pojedynczego otworu nie istnieje. Mniejsza odległość niż praktykowana ( $<5 \text{ m}$ ) prowadzi do znacznej różnicy temperatury, do  $5^\circ\text{C}$ . Może to również spowodować zamarzanie gruntu i wystąpienie zmarzliny, co następnie może doprowadzić do uszkodzeń w gruncie. Niższa temperatura na wylocie kolektora daje mniejszą moc instalacji w porównaniu do mocy pojedynczego otworu. Redukcja mocy może być kompensowana przez głębsze wiercenie. Signorelli (2004) podaje wgłębienie grupy odwiertów o 30 procent w odległości 7,5m.

Obniżenie temperatury w grupie sześciu otworów wiertniczych w odległości 7,5 m będzie, nawet w dłuższej perspektywie, dużo większe w porównaniu do pojedynczego odwiertu (Rys. 23). Chłodzenie jest bardzo silne na początku okresu 30-letniego, a następnie zmniejsza się bardziej asymptotycznie i stabilizuje się (Signorelli 2004). W modelu zakończono pozyskiwanie ciepła po 30 latach. Następnie temperatura gwałtownie wzrasta na skutek gwałtownego spadku temperatury wokół odwiertu.



Rys. 22. Porównanie w ciągu 3 lat, temperatury cieczy nośnika ciepła na wylocie kolektora między pojedynczym odwiertem a grupą sześciu otworów, w których odległości pomiędzy otworami wynosiła od 3-15 m. Brak sztucznego zrzutu. Zmodyfikowano na podstawie Signorelli (2004).



Rys. 23. Zmiana temperatury w gruncie na głębokość od 50 m do 0,1 m z odwiertu, porównanie pojedynczego - i centralnego otworu (w grupie sześciu otworów, odległość między otworami wynosi 7,5 m). Brak ciepła jest zwracane sztucznie. Moc wyjściowa jest symulowana przez okres 30 lat i odzyskiwania temperatury początkowej 12,7°C w ciągu 70 lat. Zmodyfikowano na podstawie Signorelli (2004).

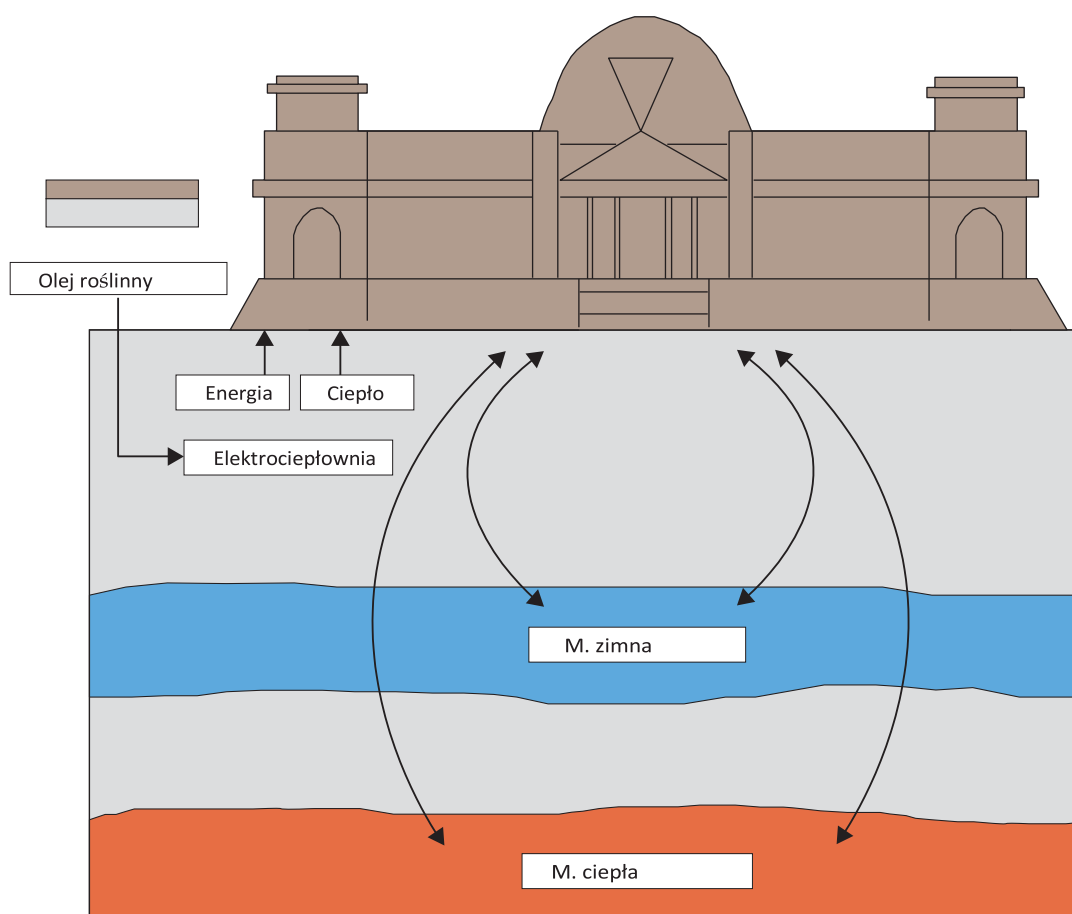


Odzyskiwanie temperatury w podłożu skalnym wokół sześciu otworów wiertniczych będzie w tym przypadku trwać około 70 lat, podczas gdy temperatura wokół pojedynczego otworu uzyska poziom wyjściowy po około 24 latach. Szacuje się, że faza regeneracji dla pojedynczego odwiertu, jest równa czasowi, w którym odwiert był w sposób zrównoważony eksploatowany (Rybach i Eugster 2002).

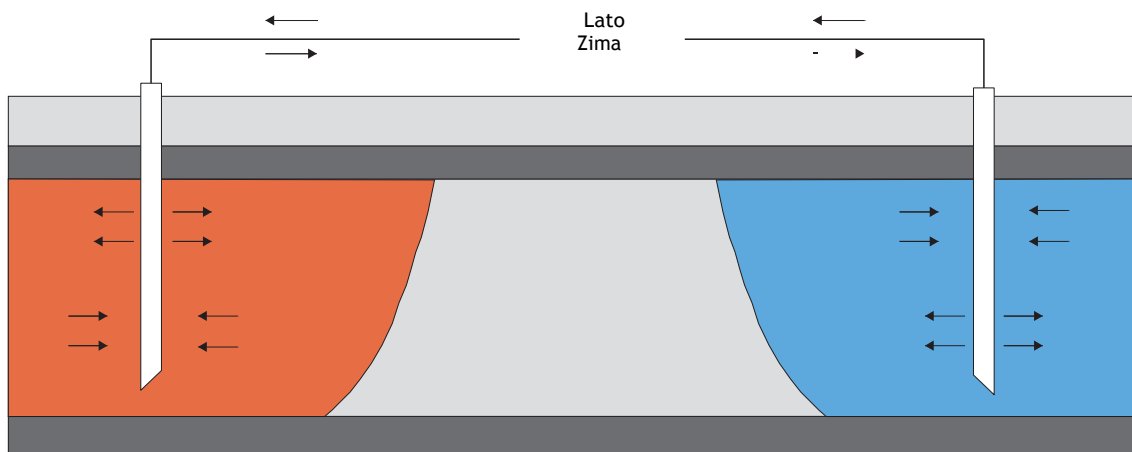
W systemie magazynowania energii w warstwach wodonośnych (ATES) wykorzystuje się z reguły mniej studni, a przepuszczalność i ruch wód podziemnych określa w głównej mierze wydajność energetyczną magazynu i zakres obszaru z oddziaływaniem termicznym. Geometria i wielkość warstwy wodonośnej odgrywają kluczową rolę. W niektórych przypadkach, magazyny warstw wodonośnych na różnych poziomach (rys. 24) albo po obu stronach przegrody (rys. 25), mogą być stosowane jako zimne i gorące części układu.

W jaki sposób oddziaływanie termiczne między ruchliwą wodą podziemną a odwiertem wpływa na moc jest jeszcze stosunkowo słabo zbadane. Przepływające wody podziemne mogą prowadzić do skutecznego (adwekcyjnego) przenoszenia ciepła, co powoduje niejednorodną zmianę temperatury w otoczeniu odwiertu (patrz rys. 26). Jednocześnie zwiększana jest moc cieplna w odwiercie, a głębokość odwiertu może być zmniejszona.

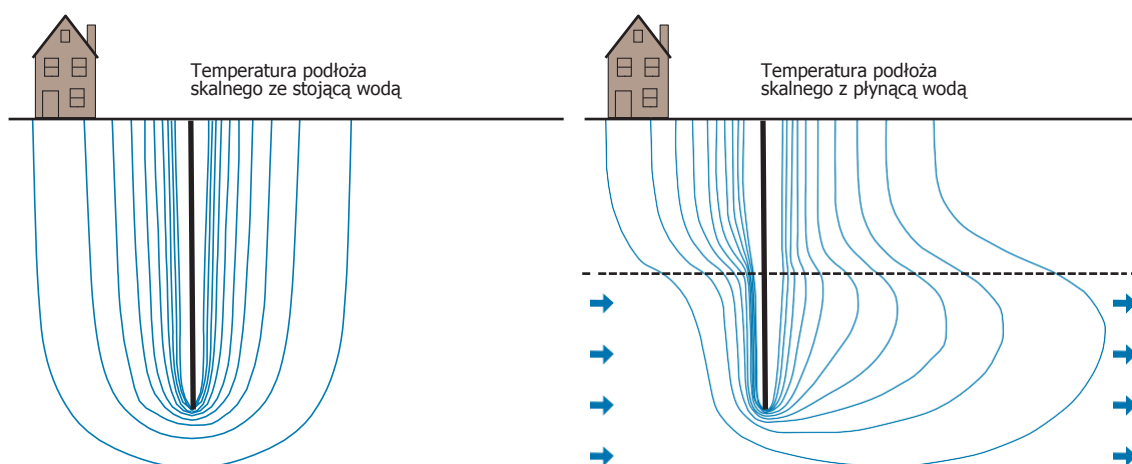
Przepływająca woda podziemna może oddziaływać termicznie na położone w pobliżu studnie energetyczne (rys. 27). Na obszarach z przepływającą wodą podziemną, moc może ulec zmniejszeniu, jeśli otwór jest wykorzystywany do magazynowania ciepła.



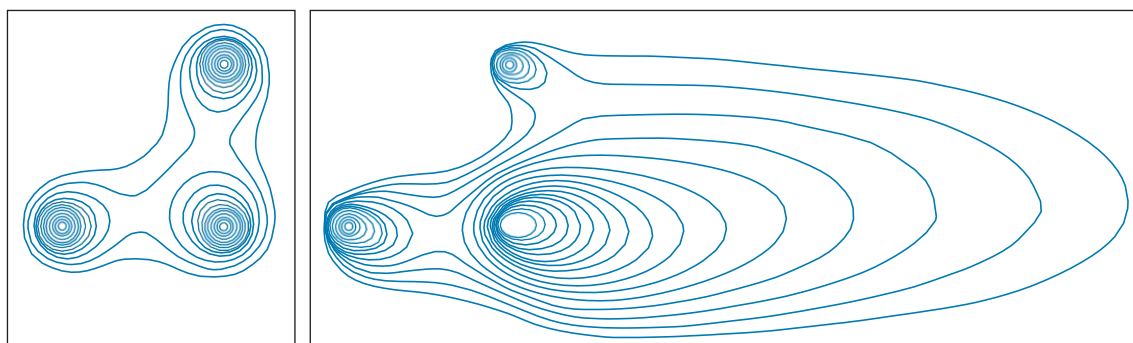
Rys. 24. Ilustracja pokazuje typowy przykład magazynowania ciepła/zimna w warstwach wodonośnych w dwóch zasobnikach, z warstwą gliny i mułu pod Gmachem Parlamentu w Berlinie, Niemcy. Instalacja jest podłączona do mniejszej ciepłowni, zasilanej olejami roślinnymi (według BINE 2003).



Rys. 25. Rysunek schematyczny ze złożami ciepłej i zimnej wody (grzanie i chłodzenie) w warstwach wodonośnych. Ciepła i zimna woda jest pobierana lub z powrotem zwracana do odpowiedniego poziomu wodonośnego, przy czym sam zbiornik wody poziomej jest stały (Bine 2003). Strzałki wskazują czerpanie i zrzut wody w okresie zimowym i letnim. Przy lotnisku Arlanda używany jest magazyn, w którym woda gorąca jest odgradzona od zimnej, częściowo za pomocą mniejszego grzbietu skalnego.



Rys. 26. Schematyczny przekrój pokazujący wpływ temperatury wody stojącej i płynącej w podłożu skalnym, w otoczeniu studni energetycznej. Linie pokazują izotermie w ziemi. Kierunek przepływu wody w odpowiednim przekroju jest oznaczony strzałkami. W modelu został przyjęty wskaźnik szybkości płynięcia 0,01 m/D (wg Bauer 2011).



Rys. 27. Schematyczny przekrój poziomy dla trzech odwiertów geotermalnych w kształcie L. Izotermie wokół studni wyraźnie pokazują wpływ statycznej (z lewej) i płynącej wody poziomej (po prawej). W modelu na prawo użyto szybkości płynięcia równą 0,05 m/d (wg Bauer 2011).

### **Przykłady przetwarzanych informacji przez SGU**

SGU w latach 2013-2014, przetworzyło i zestawilo informacje o m.in. miąższości warstw gruntu i przewodności cieplnej skał. Praca do tej pory obejmowała analizę istniejących danych dotyczących składu mineralnego, pomiary TCS i rozwój różnych generowanych komputerowo modeli. Oprócz krajowego modelu głębokości podłoża skalnego, dla dwóch obszarów, Sztokholmu i Skanii, opracowano przykładowe mapy przewodzenia ciepła. Dla Skanii wykonano także porównanie pomiędzy krajowym modelem głębokości podłoża gruntowego a ręcznie wykonanym modelem. Opis właściwości termicznych dla skał w Skanii opiera się w dużej mierze na pracy magisterskiej z Uniwersytetu w Lund (patrz Andolfsson 2013). Oprócz tej pracy, wykonano także wstępne badanie możliwości wykonania odwiertów w różnych typach skał w Skanii. Celem badania pilotażowego było sprawdzenie, czy istnieje związek między głębokością posadowienia rur okładzinowych a różnymi obszarami skalnymi. Krótkie podsumowanie przedstawiono poniżej.

### **Mapy przewodzenia ciepła- Rodzaje skał**

SGU prezentuje właściwości przewodzenia ciepła w różnych skałach w Sztokholmie i Skanii (obszary pilotażowe). Przede wszystkim dane z analiz, które podają wartość  $\lambda$  próbki skalnej, mogą być wykorzystane do tworzenia map w oparciu o wyniki analizy dla każdego rodzaju materiału skalnego i obszaru jego występowania. Ponieważ próbki zwykle są geograficznie nierównomiernie rozdzielone, a wartości  $\lambda$  odnoszą się do poszczególnych typów skał ze stosunkowo jasnymi granicami, niewłaściwe jest stosowanie metod interpolacji dla zilustrowania odchyłek w przewodzeniu ciepła w podłożu skalnym. Poprzez grupowanie analizowanych skał według rodzajów podłoża skalnego możliwa jest ocena zróżnicowania oraz zakresu wartości  $\lambda$  dla każdej grupy. Te różne zakresy są podstawą do klasyfikacji powierzchni na mapie. SGU bada możliwość wprowadzenia tego typu produktu.

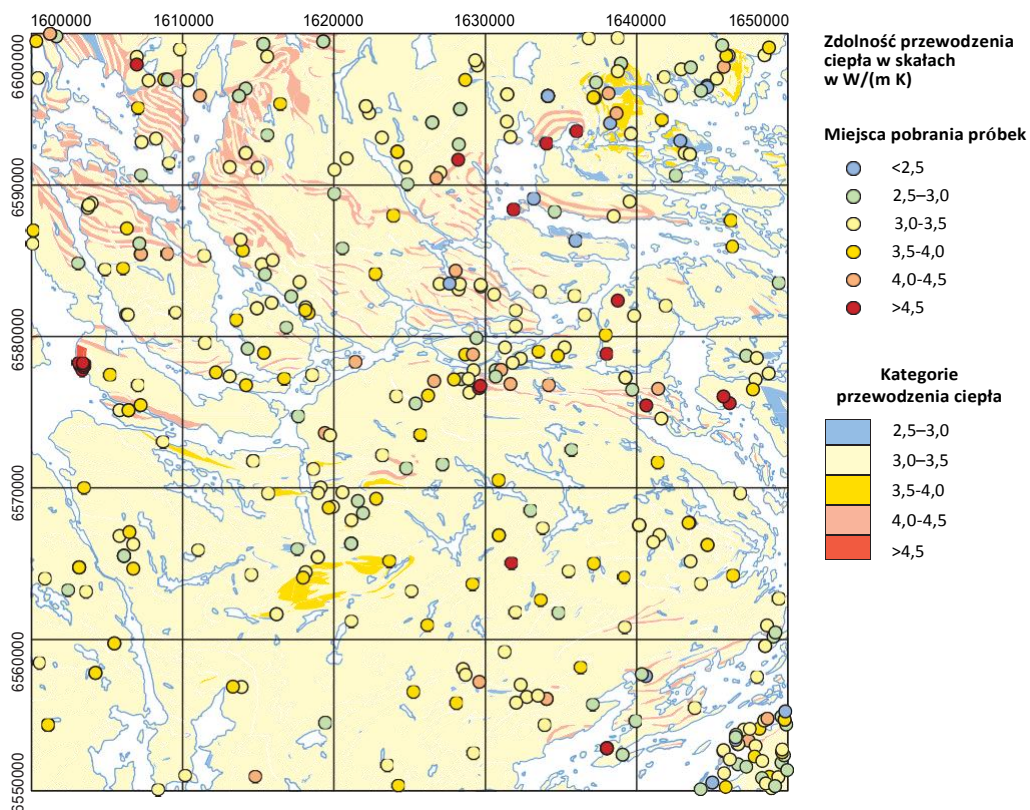
### **Mapa przewodnictwa cieplnego dla Sztokholmu**

Dane przedstawiające skład mineralny skał w obszarze Sztokholmu, wraz z informacją z pomiarów TCS na próbkach skalnych, były użyte do utworzenia mapy testowej, która pokazuje przewodnictwo cieplne w skale (rys. 28). Przewodzenie cieplne w skałach zostało podzielone na pięć klas od 2,5 do więcej niż 4,5 W/m·K. Zakres obszarów oparty jest na mapie podłoża skalnego (Persson i inni 2001). Na mapie znajduje się również informacja na temat punktowej wartości analizy dla pobranych próbek skał (Schwarz i inni 2010).

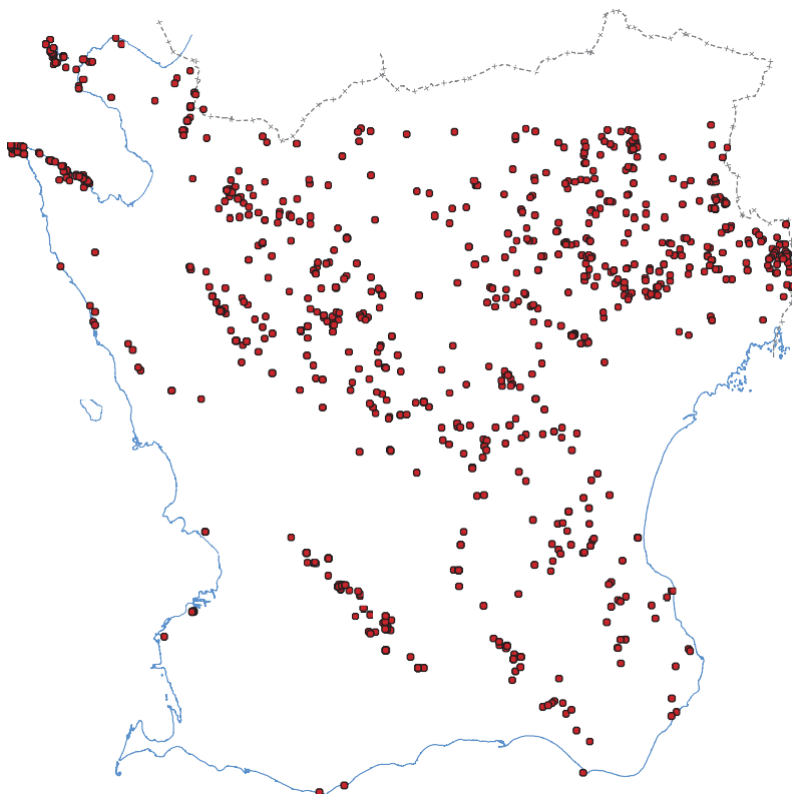
Skały na obszarach zdominowanych przez meta-osadowe i granitoidowe gnejsy i granity. Przewodność cieplna tych skał jest bardzo zróżnicowana. Średnia wartość wynosi od 3,0 do 3,5 W/m·K. Mniejsze skały w regionie składają się z bogatych w kwarc gnejsów pochodzenia osadowego i granitognejsy o średniej wartości przewodzenia ciepła w zakresie od 3,5 do 4,5 W/m·K. W przypadku obszarów z podstawowymi skałami (niska zawartość kwarcu), takimi jak gabbro i dioryt, wartość ta wynosi odpowiednio od 2,5 do 3,0 W/m·K. Występujące na małych obszarach piaskowce (Ekerö) mają najwyższe pomierzone wartości. Skały te mają przewodność cieplną większą niż 4,5 W/m·K.

### **Mapa geotermalna dla Skanii**

Jako podkładkę do mapy wykorzystano bazę składu mineralnego (analiza punktowa) dla różnych rodzajów skał w Skanii. Dane z 870 próbek, rozmieszczonych geograficznie według rys. 29, podzielono według rodzaju skały i przewodności cieplnej. Wśród analizowanych próbek przeważają skały krystaliczne, takie jak granit, gnejs, amfibolit różnego pochodzenia i diabaz. (rys. 30). To dlatego, że metoda punktowa wraz z określeniem podłoża skalnego zwykle nie jest wykonywana na skałach osadowych, przynajmniej nie rutynowo.



Rys. 28. Przykłady oszacowanej przewodności cieplnej w podłożu skalnym w regionie Sztokholmu (50 × 50 km). Mapa jest oparta na klasyfikacji pomierzonych lub obliczonych wartości przewodności termicznej dla często występujących rodzajów skał (wg Schwarz i inni 2010).



Rys. 29. Punkty poboru próbek analizowanych skał w Skanii. Źródło: Andolfsson (2013). Metoda analityczna nie jest pokazana na rysunku. Dane geograficzne z cyfrowej mapy Krajowego Instytutu Geodezyjnego.

Informacje na temat składu mineralnego niektórych piaskowców są jednak ograniczone. Dlatego Andolfsson (2013) przeprowadził dodatkowe prace polowe i analizy właściwości przewodzenia ciepłego w Skanii na skałach osadowych.

Zaledwie 200 próbek skalnych zostało przeanalizowanych pod kątem przewodności cieplnej i dyfuzji cieplnej przy użyciu TCS, patrz strona 24. Wyniki pomiarów TCS są przedstawione na rys. 31. Analizy i testy odkrywały ważną rolę w pracy magisterskiej Andolfssona i częściowo koncentrowały się na przewodzeniu ciepła w skałach osadowych Skanii, a częściowo na porównaniu obliczonych  $\lambda$  i zmierzonych wartości  $\lambda$  w urządzeniu TCS (Andolfsson 2013). Ponadto powstał przykład mapy przewodności cieplnej skał w Skanii, w ramach tej pracy.

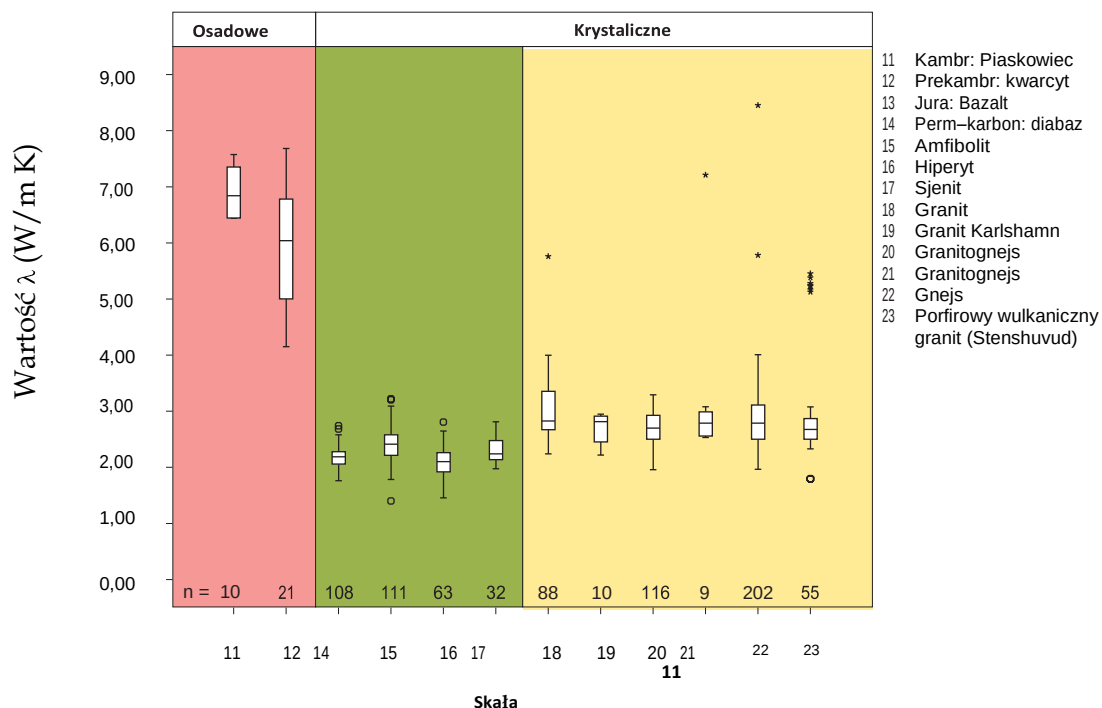
Wykresy na rysunkach 30 i 31 pokazują różnicę w wartości  $\lambda$  dla różnych grup skalnych. Dla skał osadowych podział jest stosunkowo jasny, gdzie kambryjskie piaskowce i prekambryjskie kwarcyty wykazują najwyższe wartości. Krystaliczne skały nie wykazują podobnych różnic (o ile nie wlicza się prekambryjskiego kwarcytu). Skały o stosunkowo niskiej zawartości kwarcu (amfibolit, bazalt, diabaz i sienit) mają na ogół niską wartość  $\lambda$  w porównaniu ze skałami o większą zawartość kwarcu, takimi jak granit i gnejs. Zabarwienie rodzajów skał na wykresach jest takie samo, jak pokazano na mapie tematycznej przewodzenia ciepłego w skałach w Skanii (rys. 32).

Mapa pokazana na rys. 32 przedstawia schematycznie różnorodność w przewodzeniu ciepła, według analiz przedstawionych przez Andolfsson (2013). Rozmieszczenie podłoża skalnego oparte jest na informacjach w bazie map SGU w skali 1:50 000. Mapa ma dać obraz przewodności cieplnej w podłożu skalnym na poziomie regionalnym. Poszczególne rodzaje skał, które są reprezentowane na poszczególnych powierzchniach są podzielone na klasy według legendy, a każda skała jest przypisana do klasy w oparciu o przewodność cieplną według rys. 30, a 31. Zakresy pokazane w legendzie do pewnego stopnia się pokrywają, ale widoczna jest także różnorodność wartości, występująca w każdej grupie podłoża skalnego. Należy również podkreślić, że mapa jest pierwszym testem, w jaki sposób można korzystać z kombinacji badanych i obliczonych wyników dotyczących przewodzenia ciepła, w celu utworzenia mapy, która w tym przypadku jest bardzo regionalna. Dla bardziej szczegółowej mapy wymagana jest bardziej kompleksowa analiza oraz porównanie wyników z TRT i DTTRT, a także ocena znaczenia pomiarów TCS. Oznacza to, że przedstawiona mapa może być używana tylko jako ogólna podkładka. Wynika jasno, że obszary z młodszymi skałami osadowymi mają ogólnie gorszą przewodność cieplną, a absolutnie najwyższą cechują się wszystkie obszary z prekambryjskim piaskowcem w Skanii.

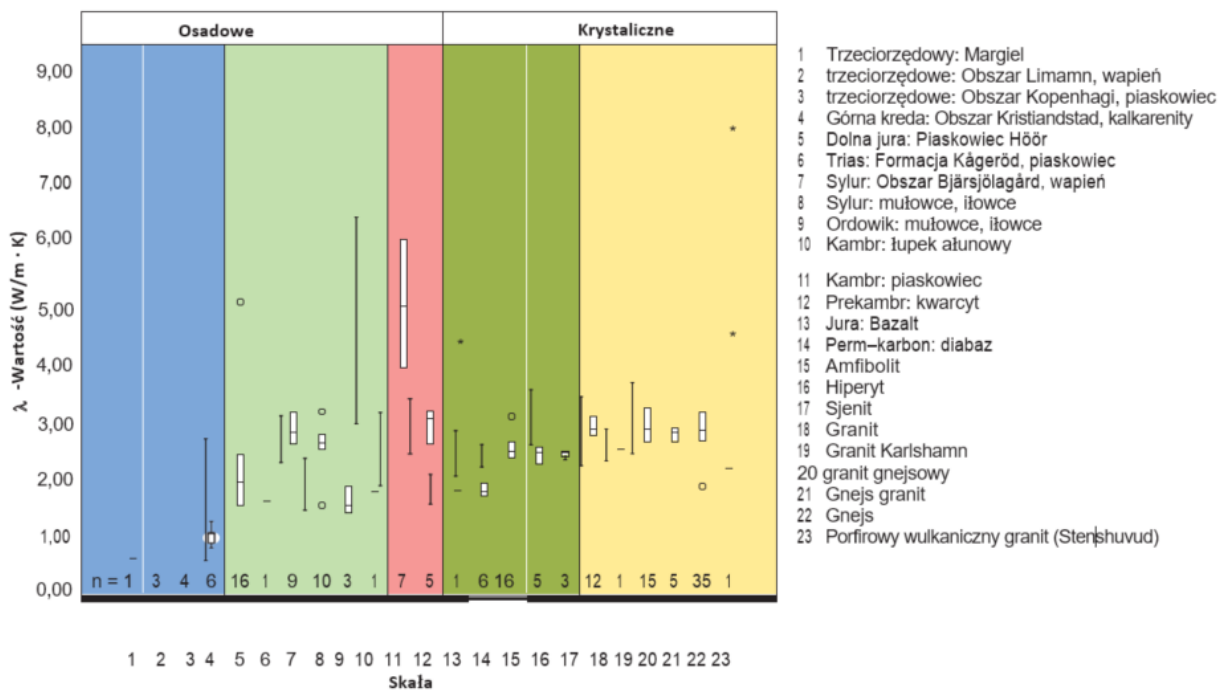
### **Ocena mapy przewodności cieplnej**

Przy tworzeniu map nie zostały wzięte pod uwagę czynniki takie jak deformacja skały, rozkład rodzajów skał, szczeliny, porowatość i przepływ wody poziomej. Wszystkie te czynniki mają wpływ na konstrukcję instalacji geotermalnej. Dla Skanii wartości mogą być mylące przede wszystkim w obszarach porowatych skał osadowych, ponieważ klasyfikacja opiera się na pomiarze TCS próbek suchej lub nienasyconej skały w gruncie. Ponieważ mapy pokazują tylko warunki na poziomie gruntu, ocena warunków na głębokości, na której wykonuje się instalacje geotermalne, może być utrudniona w przypadku występowania dużego rozwarstwienia podłoża skalnego i występowania wielu rodzajów skał. Szczególnie na obszarach o skałach osadowych, ponieważ warunki mogą być bardzo zmienne na dużej głębokości, co wpływa na właściwości całego odwiertu. W celu polepszenia wiarygodności map, wymagane są dodatkowe informacje o warunkach panujących na obszarach o niejednorodnym podłożu skalnym. Porowaty i stosunkowo miękkie, wapienie o małej zawartości kwarcu w Skanii, ma z reguły bardzo niską przewodność cieplną, ale miejscowe występowanie krzemienia i wapieni w odwiercie może znacznie poprawić właściwości termiczne odwiertu (patrz rys. 7).

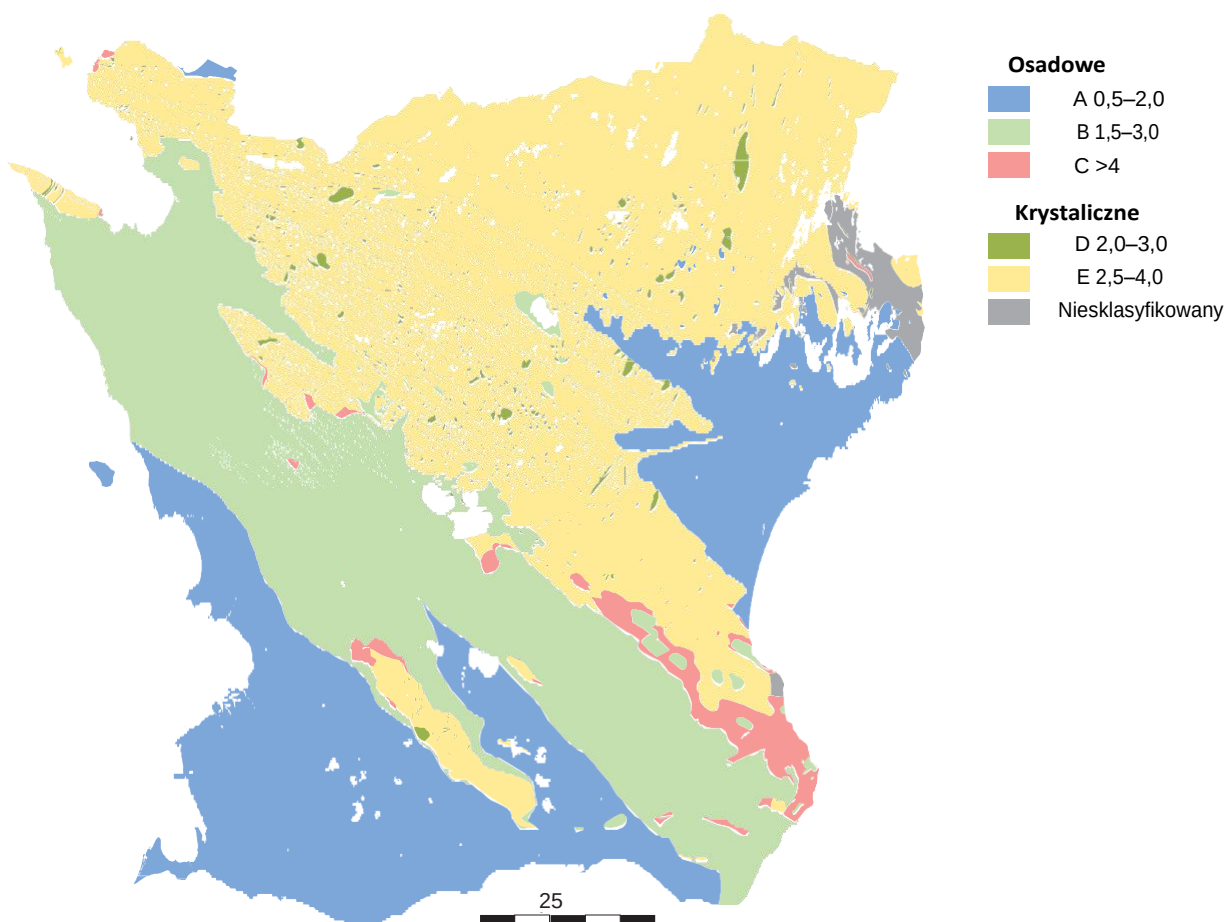




Rys. 30. Schemat blokowy przedstawiający przewodność cieplną  $\lambda$  różnych skał w Skanii, obliczoną na podstawie danych z pomiarów punktowych (skład mineralny). Dla każdej skały podano wartości max, min (pionowe słupki), rozrzut 50 procent pomierzonych wartości (białe pole), oraz medianę jako czarną poziomą linię. Odstępstwa są zaznaczone gwiazdką (po Andolfsson 2013).



Rys. 31. Schemat blokowy przedstawiający wartości  $\lambda$  próbek skalnych ze Skanii, mierzonych metodą TCS (*Thermal Conductivity Sanner*). Dla każdej skały podano wartości max, min (pionowe słupki), rozrzut 50 procent pomierzonych wartości (białe pole) oraz medianę jako czarną poziomą linię. Odstępstwa są zaznaczone gwiazdką (po Andolfsson 2013).



Rys. 32. Przykład mapy tematycznej przedstawiającej przewodzenie ciepła (W/m·K) dla podłoża skalnego w Skanii (przy powierzchni) (po Andolfsson 2013). Mapa powinna być stosowana z ostrożnością, patrz tekst.

Pojedyncze warstwy mogą w takiej sytuacji przyczyniać się w dużej części do zakresu mocy pozyskiwanej z otworu wiertniczego. Innym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę jest dyfuzja termiczna, która wskazuje, jak szybko ciepło przenosi się do podłoża skalnego. W jednorodnych warunkach podłoża skalnego o podobnych właściwościach cieplnych, oddziaływanie termiczne w otoczeniu otworu będzie stosunkowo jednorodne. Jednakże pojedyncze warstwy skalne o wyższej dyfuzji termicznej i właściwościach przewodzących ciepło, mogą powodować nieregularne oddziaływanie termiczne na otoczenie. Oddziaływanie termiczne, w poszczególnych warstwach może być dużo wyższe (lub niższe), niż w innych warstwach skalnych w tym samym odwiercie. Oddziaływanie termiczne w odwiercie zależy także od takich czynników jak obciążenie energetyczne, geometrii otworu i ponownego oddawania energii cieplnej.

Obecnie istnieją warunki, żeby stworzyć mapy pokazujące właściwości przewodzenia ciepła dla różnych obszarów skalnych na powierzchni. Możliwości do stworzenia map występują przede wszystkim dla dużych obszarów zachodniej Gotalandii, Halland, Blekinge i regionie Melar oraz w częściach Smalandii, Östergötland oraz lokalnie wzdłuż wybrzeża Norrlandii. Wraz ze wzrostem liczby pomiarów TCS na próbkach skalnych i rdzeniach, możliwe jest sprawdzenie poprawności danych dotyczących składu mineralnego, a także uzupełnienie informacji. Przy pomocy takich badań i pomiarów w odwiertach oraz porównaniu ich z danymi z badań termicznych w odwiercie, można zwiększyć wiarygodność i zakres zastosowania map.

### **Model głębokości podłoża gruntowego w Skanii**

Struktura podłoża skalnego i gruntowego w Skanii różni się znacznie od innych regionów Szwecji. Przede wszystkim, duża część skał osadowych z niejednorodną konsolidacją wpływa na warunki panujące w podłożu skalnym. Istnieją również obszary o bardzo zniszczonych skałach krystalicznych oraz miejscowe strefy uskoków i szczelin, które razem z różnorodnym składem podłoża skalnego wpływają na strukturę i miąższość gruntu. Region ten został wykorzystany jako obszar testowy, aby porównać dwie mapy - mapę głębokości podłoża gruntowego, która jest tworzona przy użyciu tej samej metody, co przy komputerowym modelu opisanym wcześniej (patrz rys. 17), z mapą utworzoną ręcznie na podstawie danych z odwiertów, na podstawie lokalnej wiedzy geologicznej.

### **Wygenerowany komputerowo model głębokości podłoża gruntowego**

Model pokazany na rys. 33 jest skonstruowany zgodnie z metodyką opisaną przez Daniels i Thunholm (2014). Opiera się ona na zasadzie tych samych informacji, co przy ręcznym tworzeniu map, z tą różnicą, że przyjmuje się pewną korelację między strukturą, a miąższością warstw gruntu oraz uwzględnia wartości przestrzenne dla m.in. szczelin w modelu obliczeniowym. Generalnie mapa zapewnia dokładniejsze rozgraniczenie głębokości podłoża gruntowego na danym obszarze, w porównaniu do modelu stworzonego ręcznie.

### **Stworzony ręcznie model głębokości podłoża gruntowego**

Stworzony ręcznie model głębokości podłoża gruntowego dla Skanii jest pokazany na rysunku 34. Model ten oparty jest na informacjach o głębokości podłoża gruntowego z archiwum studni SGU oraz obserwacji odkrytych skał. Pierwsza wersja została opracowana na zlecenie Zarządu Powiatu w Malmöhus w 2000 roku.

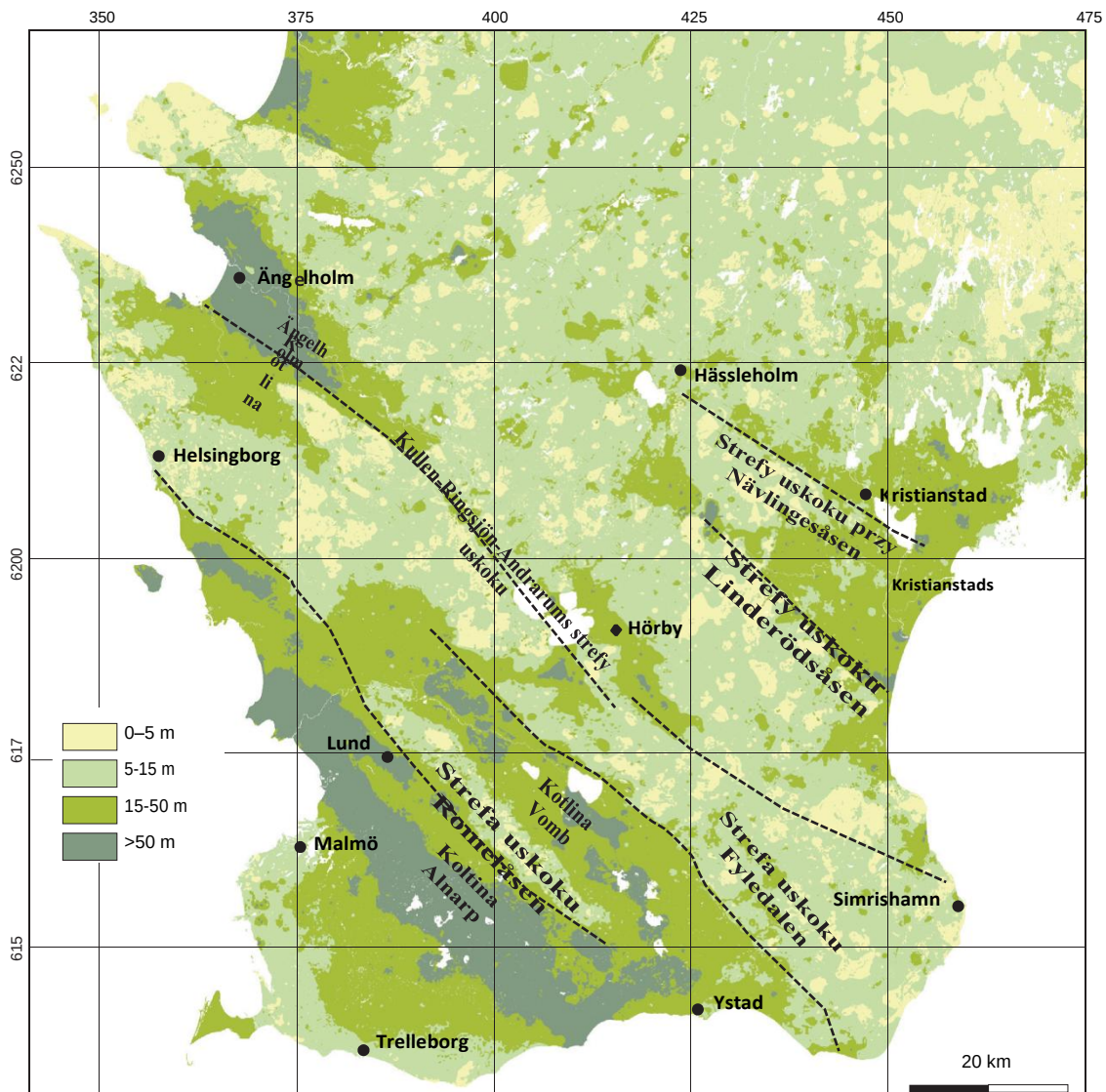
Starsza mapa SGU z południowo-zachodniej Skanii została również zastosowana jako podkładka (Gustafsson 1980). Mapy te zostały uzupełnione o nowe informacje z aktualnych baz danych. Wykorzystano dane o studniach i odwiertach wprowadzone do archiwum oraz SGU do maja 2011 roku. W archiwum znajdowały się informacje o 26,744 zarejestrowanych studni w Skanii. 1405 z nich nie sięga do podłoża skalnego. Mogą być one nadal wykorzystywane, ponieważ zapewniają informacje o minimalnej głębokości podłoża gruntowego w miejscu odwiertu, zwłaszcza na obszarach, gdzie istnieje niewielka ilość innych odwiertów. Liczba odwiertów w południowej Szwecji jest stosunkowo duża w porównaniu do innych części kraju. W obszarach miejskich, istnieje zwykle więcej niż 10 studzienek na kilometr kwadratowy. W całym regionie średnia wynosi około 3 studnie na kilometr kwadratowy.

Informacje o powierzchniach skalnych (odkryte skały) również zostały zaczerpnięte z bazy danych. W sumie 14 050 powierzchni skalnych i około 4000 obiektów liniowych (np. odcinków drogi) lub punktowych (skały) w bazie danych.

Model ten został poprawiony ręcznie na podstawie nowych danych. W przypadkach, gdy dane dotyczące głębokości podłoża gruntowego znacznie odbiegają od pobliskich danych, informacje są porównywane z protokołami studni. W starszych protokołach studni często podawane szczegółowe informacje na temat struktury podłoża gruntowego i skał, co może znacząco poprawić interpretację.

### **Ocena modelu głębokości podłoża gruntowego**

Oba modele wykazują w dużym stopniu ten sam rozkład głębokości podłoża gruntowego oraz połączenie pomiędzy grubością podłoża a strukturą skały, a także obecnością dużych stref uskokowych. Widoczny, północno-zachodni trend na obszarach o dużej głębokości podłoża gruntowego, co pokrywa się z kierunkiem głównych stref uskokowych w podłożu skalnym w Ringsjön, Andrarum, Romeleåsens i Fyledalens. Oczywisty jest także fakt, że warstwy gruntu nie są tak głębokie w obszarach skał krystalicznych i paleozoicznych rys. 35.

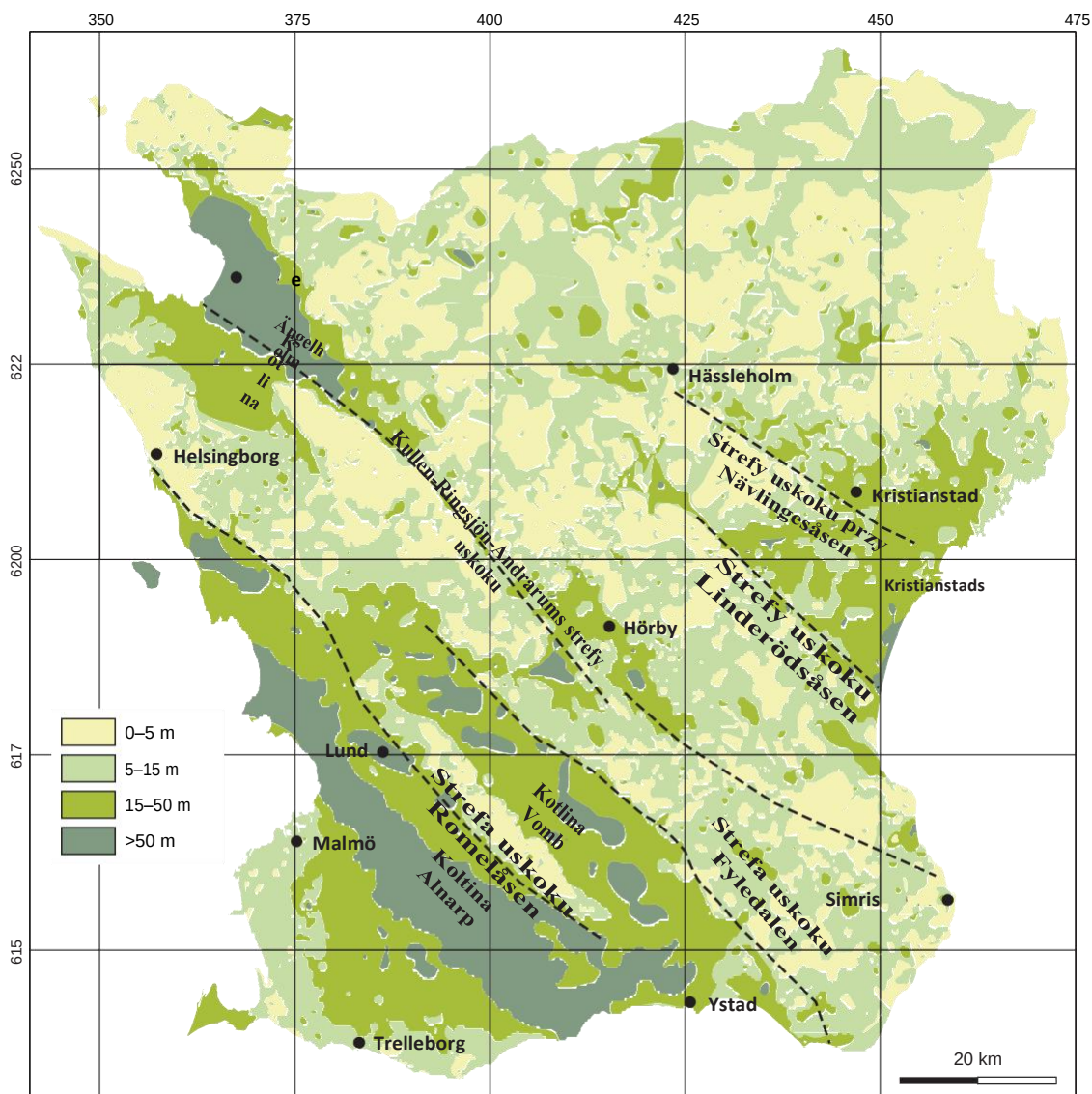


Rys. 33. Wygenerowana komputerowo mapa grubości gruntu według metodyki opisanej przez Daniels & Thunholm (2014).

Grunty na tych obszarach są zdominowane przez moreny, a głębokość gruntu wynosi nie mniej niż 15 m. Lokalnie mogą występować duże różnice, zwłaszcza w centrum Skanii, gdzie występuje podłoże skalne podatne na wietrzenie. Tutaj strefa wietrzenia może mieć grubość do 100 m. Szacuje się, że model generowany komputerowo może dać zbyt szczegółowy obraz głębokości podłoża gruntowego na tych obszarach.

Głębokość podłoża gruntowego w południowo-zachodniej Skanii jest stosunkowo prosta do oceny i obliczenia, zarówno ze względu na dużą liczbę otworów oraz obecność jednorodnych warstw gruntu i jednolitego podłoża skalnego. Oba modele pokazują mniej więcej te same miąższości gruntu. Warstwy o największej głębokości odnotowano w kotlinie Alnarp, która jest wydzieloną doliną w podłożu skalnym. Istnieją informacje o gruncie zalegającym aż do głębokości 183 m.





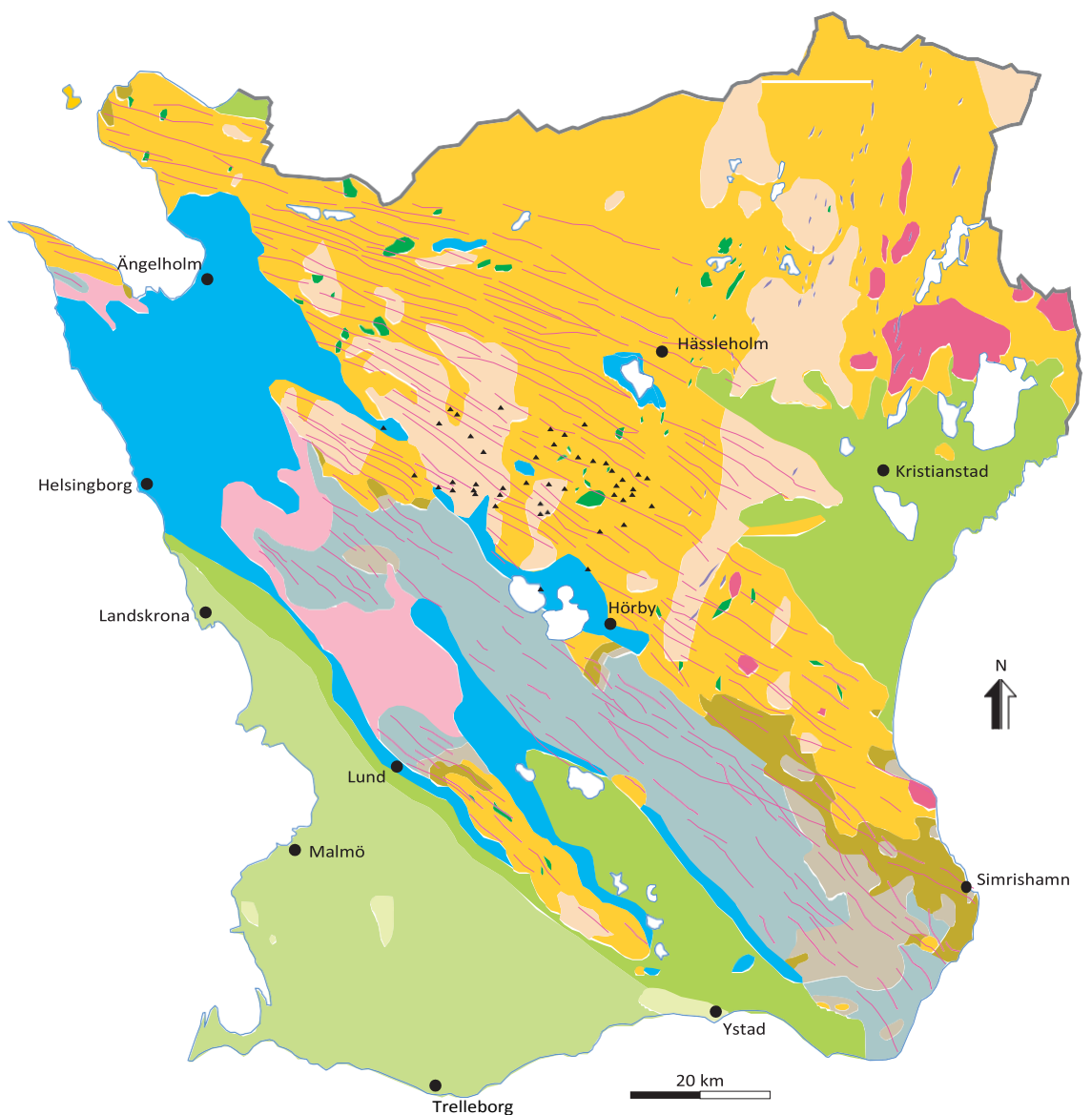
Rys. 34. Model głębokości podłoża gruntowego, utworzony ręcznie, na podstawie informacji z odwiertów oraz lokalnej wiedzy geologicznej.

Kotlina jest dobrze udokumentowana za pomoc badań geofizycznych odwiertów. Występowanie żwiru w jej głębszych częściach stanowi istotną warstwę wodonośną. Głębokość została wcześniej udokumentowana przez Gustafsson (1980).

W obydwu modelach pojawiają się duże głębokości podłoża gruntowego w dolinie Angelholm, Vomb i Kristianstad, które pokrywają się z obszarami o stosunkowo słabo skonsolidowanym, młodszym, osadowym podłożu skalnym. Obszary są jasno rozgraniczone w strefach uskoku i przy grzbietach skalnych, tzw. obszar zrębu tektonicznego w Skanii.

Na południowy wschód od Wschodniego Ringsjön i kotliny Vomb występują doliny w podłożu skalnym, utworzone prawdopodobnie w okresie przed czwartorzędem (kreda i trzeciorzęd). A następnie w procesie erozji w okresie czwartorzędu otrzymały dzisiejszą formę. W tych obszarach znajdują się również warstwy gruntu o dużej miąższości (Sivhed 1991), często 20-50 m.





#### Osadowe podłoże gruntowe

- Paleocen–eocen: Głina węglanowa, pyłowiec i margiel
- Dan: biało–jasnoszare wapienie mszyciołów z krzemieniem
- Młoda kreda: kreda pizująca, wapień piaskowy, wapień skorupiakowy, wapień gliniasty i piaskowiec
- Jura: piaskowiec, glina, iłowce i węgiel
- Jura: wulkaniczne tufy i bazalt

- Młody trias: czerwono-brązowe-zielone gliniaste piaskowce, konglomeraty i gliny (formacja Kågeröd)
- Sylur: zdominowany przez szare-ciemnoszare łupki, pyłowce, z elementami wapienia i piaskowca (Öved– Ramsåsa) w najmłodszych częściach
- Młody kambr - starszy ordowik: łupki alunowe z elementami wapienia siarkonożnego i wapienia. Ordowik: ciemnoszare łupki z elementami ciemnoszarego-czarnego wapienia.
- Starszy kambr: piaskowiec kwarcowy

#### Skały prekambry

- Perm–karbon: żyły diabazowe
- Granit: czerwony, średnioziarnisty i bogaty w skalenie
- Amfibolit: żyły, soczewki i sztokwerki, często granatonożne
- Hiperyt: drobno- i średnioziarniste skały magmowe
- Gnejsgranit: średnio- i gruboziarnisty, czerwono-szare żyły i sztokwerki
- Ortognejs: drobnoziarnista, czerwona lub czerwono-szara

Rys. 35. Mapa podłoża gruntowego w Skanii, gdzie występują zarówno skały osadowe jak i krystaliczne.

### Wiercenie geotermalne w podłożu skalnym w Skanii

Podłoże gruntowe w Skanii jest wyjątkowe. Występują w nim zarówno skały krystaliczne, takie jak granit czy gnejs oraz młodsze skały osadowe, takie jak wapień, łupki czy piaskowce (Rys. 35). Oznacza to, że warunki do wiercenia są bardzo zróżnicowane, ze względu na duże różnice twardości skały, porowatości, uwarstwienie i przepływy wody. Wszystkie te czynniki wpływają na konstrukcję instalacji geotermicznych. Informacja o głębokości gruntu jest bardzo ważna. W skałach osadowych wymagana jest zazwyczaj większa głębokość odwiertu niż w podłożu krystalicznym, ze względu na gorsze właściwości przewodzenia ciepła w skałach osadowych. Istnieje również różnica pomiędzy południową a północną Szwecji z powodu innej średniej temperatury w gruncie. Oznacza to, że wymagana głębokość odwiertu w Norrlandii dla analogicznego podłoża skalnego i projektowanej mocy jest większa niż w Skanii.

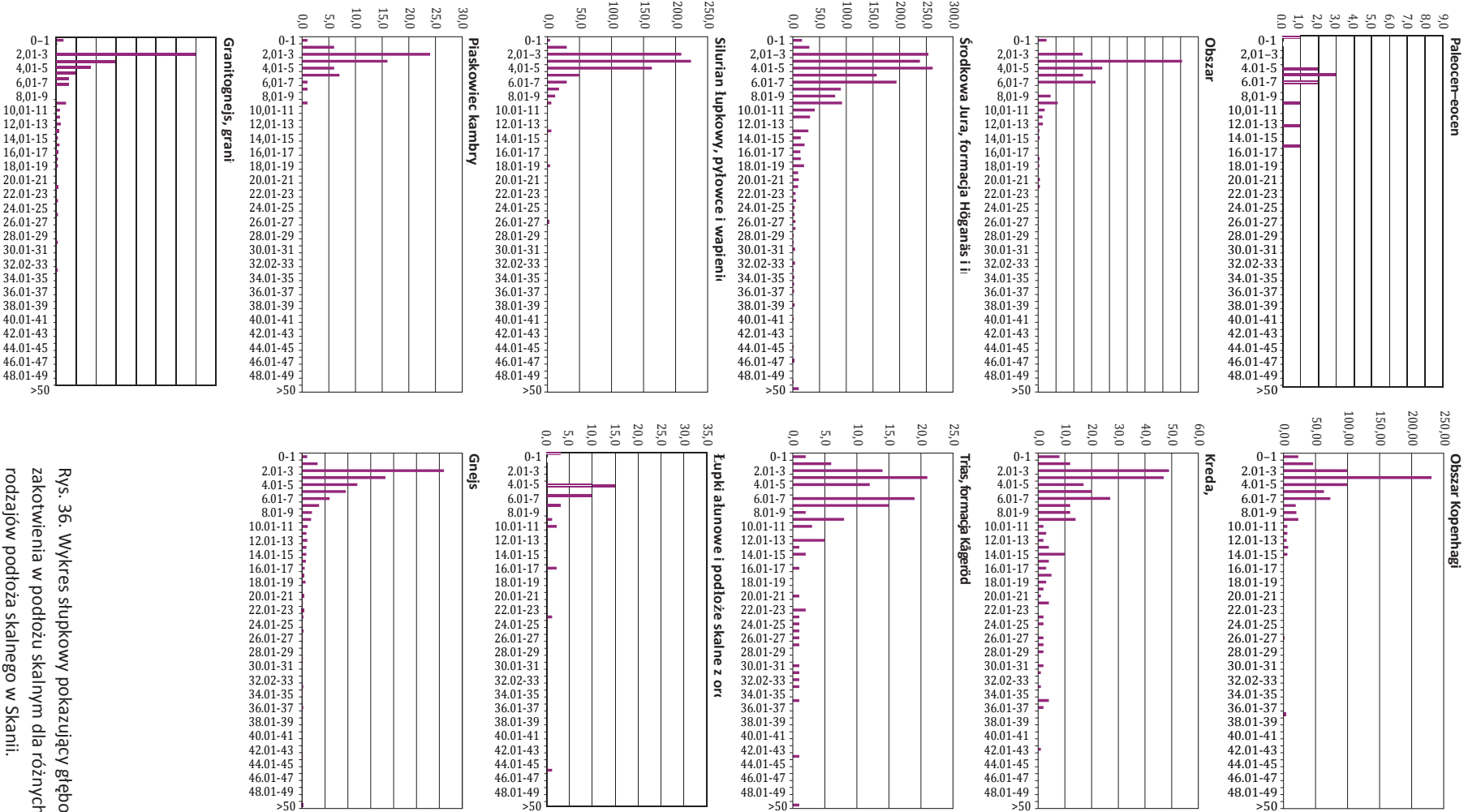
Poza termicznymi właściwościami podłoża skalnego, jego gęstość ma zasadnicze znaczenie. Skalne właściwości in situ określają między innymi głębokość odwiertu. Stabilność podłoża skalnego i możliwość wiercenia, ma ogromne znaczenie w celu osiągnięcia tych głębokości. Na obszarach o bardzo twardym podłożu skalnym (kwarcyt) wiercenie może okazać się bardzo kosztowne z powodu nadmiernego zużycia wiertła i rur. Na obszarach o popękanym lub wywietrzałym podłożu skalnym, na przykład przy strefach uskoków, osiągnięcie projektowanej głębokości może być bardzo utrudnione z powodu zapadającej się ziemi.

Istnieje wyraźna korelacja między rodzajem skał a głębokością zakotwienia rur okładzinowych w podłożu skalnym.

Odwierty geotermalne w młodszych skałach osadowych, np. w północno-zachodniej części Skanii, wymagają większej głębokości zakotwienia rur okładzinowych w podłożu skalnym, niż na skałach twardszych, takich jak kambryjski piaskowiec. Zestawienie ponad 7 100 protokołów otworów wiertniczych przedstawiono w Tabeli 2 i na rys. 36. Informacje te mogą być wykorzystane do oszacowania łatwości wiercenia, ale również w celu wstępnego oszacowania kosztów.

Tabela 2. Zestawienie posadowienia rur okładzinowych w różnych rodzajach skał i podłożach skalnych w Skanii (patrz również rys. 36).

| Formacje, podłoże skalne | Ilość odwiertów | Głębokość zakotwienia rur okładzinowych |      |
|--------------------------|-----------------|-----------------------------------------|------|
|                          |                 | Mediana                                 | Max  |
| Paleocen–eocen           | 32              | 3,0                                     | 16,0 |
| Obszar Kopenhagi         | 730             | 3,1                                     | 37,0 |
| Obszar Limhamn           | 1291            | 4,0                                     | 73,0 |
| Kreda                    | 282             | 5,0                                     | 42,0 |
| Środkowa jura:           | 1742            | 5,3                                     | 80,0 |
| Kågeröd                  | 152             | 6,0                                     | 63,0 |
| Sylur                    | 757             | 3,0                                     | 26,0 |
| Ordowik - łupki afunowe  | 119             | 3,0                                     | 45,5 |
| Kambr: Piaskowiec        | 63              | 3,0                                     | 9,0  |
| Gnejs                    | 1984            | 4,3                                     | 64,3 |
| Gnejs granit             | 853             | 3,0                                     | 34,0 |



Rys. 36. Wykres słupkowy pokazujący głębokość zakotwienia w podłożu skalnym dla różnych rodzajów podłoża skalnego w Skanii.

## DYSKUSJA

Prace dotycząca zagadnień energetyki geotermalnej jest naturalnym elementem roli SGU i zgodna z polityką zrównoważonego rozwoju. Istnieją wyraźne wytyczne dotyczące roli SGU w spełnianiu celów środowiskowych:

*„SGU jest krajowym instytutem, odpowiedzialnym za cel środowiskowy „Dobrej jakości wody podziemne”. Ten cel obejmuje również zachowanie naturalnych złóż żwiru, które są ważne dla zaopatrzenia w wodę pitną, przechowywania energii oraz zachowania krajobrazu naturalnego i kulturowego.*

Rola SGU w perspektywie zrównoważonego rozwoju jest opisana w polityce zrównoważonego rozwoju SGU:

*„SGU będzie wykorzystywać swoją wiedzę i rolę rządową, aby przyczynić się do zrównoważonego rozwoju społeczeństwa. To z czym pracujemy, w jaki sposób oraz w jaki sposób podejmowane są nasze decyzje - ma znaczenie. Rola i zakres pracy SGU jest określony częściowo przez zadania opisane w regulacjach, a częściowo przez prawo odnoszące się do działalności SGU. Nasza polityka zrównoważonego rozwoju powinna koncentrować się na obszarach, które są w zakresie naszych urzędowych zadań.*

Wizja SGU zrównoważonego społeczeństwa i energii geotermalnej (wyciąg z polityki zrównoważonego rozwoju SGU):

- Użytkowanie energii powinno być efektywne z dużym udziałem energii odnawialnej.
- Dostęp do czystej wody pitnej powinien być zapewniony przez kompleksowe kontrole wody oraz zminimalizowanie uwalniania się niebezpiecznych substancji. Wydobywanie żwiru zostało zredukowane do minimum i występuje tylko wtedy, gdy nie narusza się przy tym cennych zasobów wód podziemnych oraz obszarów mających znaczenie dla środowiska naturalnego i kulturowego lub dla wykorzystania energii geotermalnej.

Ważnym zadaniem w dalszych pracach SGU, jest pogodzenie różnych interesów za które SGU jest odpowiedzialne, dotyczących ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju. Istnieje pewne ryzyko związane z energetyką geotermalną, które musi zostać minimalizowane, aby nie kolidowało z ochroną wód podziemnych. Ewentualne konflikty między energią geotermalną a ochroną wód podziemnych:

- Rozprzestrzenienie się słonych wód podziemnych i zanieczyszczeń, zarówno podczas wiercenia jak i eksploatacji.
- Możliwe konsekwencje ocieplenia wód podziemnych w związku z magazynowaniem energii w warstwach wodonośnych. Abesser (2007) i Hähnlein (2013) opisali m. in. te konsekwencje dla europejskich systemów geotermalnych.

SGU odgrywa ważną rolę jako organ doradczy dla oceny możliwości wykonania instalacji geotermalnych na obszarach ochrony wód. Jeśli chodzi o ochronę wód jest to najczęściej stosunkowo jasne, które wytyczne i przepisy obowiązują dla danej strefy (obszaru ochrony). Jednak lokalnym urzędnikom ciężko jest właściwie ocenić i podjąć decyzję dotyczącą zgody na instalację na różnych obszarach, na których mogą występować również inne problemy, które należy wziąć pod uwagę. Im intensywniej SGU pracuje w kwestii energii geotermalnej i jej oddziaływania na ochronę wód podziemnych, tym lepsze decyzje będą podejmowane przez urzędników. Zdobywanie nowej wiedzy otwiera nową ścieżkę porozumienia między różnymi interesami geoenergetyki i ochrony wód podziemnych.

W niniejszym raporcie zostały przedstawione informacje, które mogą być wykorzystane do oceny metody, projektu i kosztów związanych z instalacją geotermalną. Będziemy kłaść nacisk na różne perspektywy użytkowników na informacje przekazywane przez SGU. Za pomocą map i serwisów tematycznych, informacje mogą być kierowane do różnych grup użytkowników.

Istnieją pewne podstawowe kwestie, które wyjaśnić, aby informacje były jak najbardziej użyteczne i stosowane prawidłowo:

- Jak użytkownik ma wiedzieć, w jaki sposób informacje powinny być wykorzystywane i jakie ograniczenia istnieją? Odształcenia, pęknięcia, wielkości ziarna, naprężenia skalne i porowatość skał nie zostały uwzględniane w niniejszym raporcie, ale mogą mieć kluczowe znaczenie dla wydajności danego systemu.
- Ważne jest, aby opisać informacje w jasny sposób. Istnieją zarówno bardziej jak i mniej branżowi użytkownicy. W wielu przypadkach, branżowy użytkownik może bezpośrednio odczytać z istniejącej dokumentacji geologicznej, jakie panują warunki na danym obszarze. Dzisiaj wiele firm wiertniczych korzysta regularnie z informacji SGU. Inni użytkownicy mogą potrzebować wskazówek i uproszczenia obszernej dokumentacji SGU.
- Skala dokumentacji SGU sprawia, że informacje te są zazwyczaj dostosowane do ogólnego planowania. Na jednorodnych obszarach geologicznych i na obszarach, które są dokładnie badane, informacje są bardziej przewidywalne i pewne. Ważne jest, żeby skala była jasno i czytelnie przedstawiona na mapie. W przeglądarce map powinny być widoczne granice jak daleko można przybliżyć i oddalić widok.

Ponieważ informacje SGU są najczęściej dwuwymiarowe i brakuje informacji o warunkach skalnych na głębokości, konieczne jest, aby opisać w jaki sposób można oszacować co znajduje się kilkaset metrów w podłożu skalnym, czyli na głębokości, na której zazwyczaj znajduje się instalacja geotermalna. Ważne jest wyjaśnienie różnic między obszarami skał krystalicznych z gnejssem czy granitem, a obszarami z warstwową skałą osadową, jak np. w Skanii.

Wiedza SGU o podłożu skalnym, gruncie, wodach podziemnych i warunkach geofizycznych zapewnia warunki do właściwego wsparcia dotyczącego energii geotermalnej. Oprócz wiedzy geologicznej, SGU posiada również urządzenia laboratoryjne do przeprowadzania analiz, które umożliwiają pomiar przewodności cieplnej, współczynnika dyfuzji cieplnej i pojemności cieplnej próbki skał oraz warunki temperaturowe w odwiercie. Ponadto SGU otrzymuje rocznie kilka wyników z analizy punktowej. Obecnie prowadzone są prace nad stworzeniem bazy danych, z informacjami na temat właściwości termicznych skał. W związku z badaniem wody podziemnej i powierzchniowej, będą pozyskiwane również inne ważne informacje dotyczące instalacji geotermicznych.

W uzupełnieniu do informacji zgromadzonych przez regularne prace SGU nad tworzeniem map, inne badania mogą zwiększyć wiedzę na temat warunków geologicznych, które mogą być istotne przy instalacjach geotermalnych. Ponadto, informacje od innych organizacji i jednostek mogą przyczynić się do rozszerzenia wiedzy. Na przykład wykonywane pomiary TRT. Wyniki pomiarów pokazują warunki termiczne w odwiercie i zapewniają kompleksowy obraz geologicznych i hydrogeologicznych czynników wpływających na zdolność do termicznego „komunikowania” się z otoczeniem. Pomiary te mogą być cennym uzupełnieniem informacji dostarczanych przez SGU.

Archiwum odwiertów SGU jest najczęściej używaną bazą w SGU. Baza danych jest wykorzystywana zarówno do użytku wewnętrznego i zewnętrznego i stanowi solidną podstawę dla różnych projektów, w tym badań hydrogeologicznych. Biorąc pod uwagę, że informacje oraz archiwum pochodzi wyłącznie ze źródeł zewnętrznych, zapewnienie jakości jest niezmiernie ważne. Wymagany jest ciągły dialog zarówno między poszczególnymi wykonawcami a organizacją branżowych.



Konieczne jest stworzenie wzajemnego zrozumienia i zapewnienia możliwości wymiany doświadczenia na temat wód gruntowych i zagadnień geoenergetycznych, a więc ostatecznie poprawy jakości i zawartości bazy danych.

Poprawa zarówno zapisu jak i korzystania z informacji o studniach jest jak najbardziej możliwa. Już w obecnej chwili, są sporządzane notatki w protokołach odwiertów i studni, które nie są rutynowo przechowywane w bazie danych SGU. Notatki z obserwacji poczynionych podczas wiercenia na temat szczelin, przepływu wody w różnych strefach, przewodności, rodzaju skały i koloru zwiercin oraz prędkości wiercenia, są różnej jakości i o różnym zakresie. Takie informacje mogą być jednak przydatne dla oceny warunków hydrogeologicznych podłoża skalnego. Celem SGU jest przechowywanie i udostępnianie tych informacji. Daje to większą motywację firmom wiertniczym do wypełnienia danych i tym samym poprawianie informacji w bazie danych, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym.

Podobnie jak w pozostałych częściach świata, rozwój obszarów miejskich w Szwecji wiąże się ze zwiększonym zapotrzebowaniem na wiedzę na temat gruntu i wód podziemnych na rzecz zrównoważonego planowania miast i infrastruktury. Wiedza obejmuje budowę tuneli, okablowania, systemów kanalizacyjnych i budynków, ale także wykorzystania zasobów, takich jak energia geotermalna. SGU uczestniczy w projekcie unijnym SUB - URBAN ([www.suburban.eu/](http://www.suburban.eu/)), który rozpoczął się w 2013 roku, a zakończył w 2016 roku. Projekt będzie badać, stymulować i inicjować przedsięwzięcia mające na celu wykorzystywanie wód podziemnych w środowisku miejskim. Może to być na przykład pozyskiwanie wody pitnej i energii geotermalnej, monitoring wód podziemnych, gruntów, stabilności podłoża gruntowego, ryzyka powodziowego, erozji wybrzeży i terenów podmokłych. Projekt SUB-URBAN zaprezentuje szereg projektów, problemów i proponowanych rozwiązań, które bezpośrednio lub pośrednio odpowiadają na pytania dotyczące energii geotermalnej. Między innymi zostanie wyjaśnione w jaki sposób należy monitorować zwierciadło, jakość i temperaturę wód podziemnych, a także jak wykonać modelowanie geotermalne. Wyniki pozwolą zaplanować w jaki sposób można i powinno się korzystać z gruntu i wód podziemnych bez negatywnego wpływu na inne interesy. Wyniki projektu będą składać się z częściowych raportów o różnym ukierunkowaniu i będą dostępne w języku angielskim na stronie internetowej projektu. SGU będzie potem tłumaczyć wybrane fragmenty wyników na j. szwedzki.

Wnioskiem niniejszego raportu jest, że SGU posiada wiele przydatnych informacji geologicznych dla oceny instalacji geotermalnych, ale czujemy potrzebę ściślejszej współpracy między agencjami rządowymi, instytucjami badawczymi i organizacjami branżowymi w celu zwiększenia umiejętności i wiedzy na temat potencjału energetyki geotermalnej w Szwecji. Wspólne zrozumienie problemów i możliwości rozwoju z punktu widzenia technicznego, naukowego i gospodarczego, uznaje się za niezbędne dla wzmocnienia roli energetyki geotermalnej w zrównoważonym rozwoju.

## **PODZIĘKOWANIA**

Podziękowania dla organizacji branżowych Avanti i GEOTEC José acuña (KTH), Göran Persson (HP Borringar AB), dla värmepumpsgruppen (Pompy ciepła) (Stockholms stad), za wniesienie cennych uwag, które znacząco polepszyły treść raportu. Dziękujemy Magdalenie Thorsbrink za opracowanie rysunków 1-5 oraz Bo Thunholm za redakcję tekstu oraz pomoc przy rysunkach 10 i 19. Dziękujemy Annie Hedenström i Kerstin Finn za redakcję tekstu.

## BIBLIOGRAFIA

- Abesser, C., 2007: Openloop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems. *British Geological Survey Open Report OR/10/045*, 31 s.
- Acuña, J., 2013: Distributed thermal response tests – New insights on Upipe and Coaxial heat exchangers in groundwaterfilled boreholes. *KTH Report 13/01*, 138 s. (Doktorsavhandling)
- Andolfsson, T., 2013: Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses by use of Thermal Conductivity Scanner: A study of thermal properties in Scanian rocks. *Dissertations in Geology at Lund University 189*, 27 s. (Mastersuppsats).
- Bauer, D., 2008: *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. Blackwell, Oxford. 351 miejsce
- Barth, J., Andersson, O., Nordell, B., Hellström, G., Berg, M., Gehlin, S., Frank, H. & Risberg, G., 2012: Geoenergetyka w społeczeństwie - ważny element w zrównoważonej dostawie energii. *Geotec 2012:1*, 92 s.
- Bauer, D., 2011: *Zur thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern*. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Universität Stuttgart, Diss., 136 s.
- Beltrami, H., Matharoo, G.S., Tarasov, L., Rath, V. & Smerdon, J.E., 2014: Numerical studies on the Impact of the Last Glacial Cycle on recent borehole temperature profiles: implications for terrestrial energy balance. *Climate of the Past 10*, 1693–1706.
- BINE, 2003: *Aquiferspeicher für das Reichstagsgebäude*. Energieforschung für die Praxis 13. <<http://www.bine.info>>
- Bjelm, L. & Rosberg, J.E., 2006: Recent geothermal exploration for deep seated sources in Sweden. Geothermal resourcessecuring our energy future: proceedings of the GRC Annual Meeting, San Diego, California, 10–13 September 2006. *Geothermal Resources Council Transactions 30*, 655–658.
- Bonsor, H.C., Dahlqvist, P., Moosemann, L., Classen, N., Epting, J., Huggenberger, P., Jantza, M., Laursen, G. & Gogu, C.R., 2015: Groundwater, geothermal modeling and monitoring at cityscales –Identifying good practice, and effective knowledge exchange. COST Subsurface Action – working group 2 report, 50 s.
- Claesson, J. & Eskilson, P., 1987: Conductive heat extraction by a deep borehole. Thermal analy ses and dimensioning rules. 29 s. I P. Eskilson, 1987: *Thermal analyses of heat extraction bore- holes*, Doktorsavhandling, Matematisk fysik, Lunds universitet. 222 s.
- Clauser, C. & Huenges, E., 1995: Thermal conductivity of rocks and minerals. I T.J. Ahrens (red.): *Rock physics and phase relations – a handbook of physical constants. AGU Reference Shelf 3*, 105–126.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Ogólnokrajowy model głębokości podłoża gruntowego. *Sveriges geologiska undersökning Raporty i wiadomości 2014:14*, 14 s.
- Dreyer, W., 1974: *Materialverhalten anisotroper Festkörper: Thermische und elektrische Eigenschaften. Ein Beitrag zur Angewandten Mineralogie*. Springer, Wien, New York, 295 s.
- EG, 2009: *Dyrektywa w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE i 2003/30/WE*. Dyrektywa Parlamentu i Rady UE 2009/28/EG z dnia 23 kwietnia 2009.
- Eliasson, T., Eriksson, K.G., Lindquist, G., Malmquist, D. & Parasnis, D., 1991: Catalogue of heat flow density data: Sweden. In E. Hurtig, m.fl. (ed.): *Geothermal atlas of Europe*. International association for seismology and physics of the earth's interior. International Heat Flow Commis sion, Central Institute for Physics of the Earth. Hermann Hack Verlagsgesellschaft, 124–125.
- Erlström, M., 2014: Gaz łupkowy i biogazy w łupkach alunu w Szwecji, występowanie i warunki - przegląd. *Sveriges geologiska undersökning (przyp.łł. Szwedzki Instytut Geologiczny) Raport SGU 2014:19*, 28 s.

- Eskilson, P., 1987: *Thermal analyses of heat extraction boreholes*, Doktorsavhandling, Matematisk fysik, Lunds universitet, 222 s.
- Eugster, W.J., 2001: Langzeitverhalten der EWSAnlage in Elgg (ZH), Spotmessung vom Herbst 2001. *Final Report*, Swiss Federal Office of Energy, Berne, 14 s.
- Fetter, C.W., 2001: *Applied hydrogeology*. PrenticeHall Inc., Upper Saddle River, 598 s.
- Gehlin, S., 1998: Thermal Response Test – in situ measurements of thermal properties in hard rock. *Luleå University of Technology, Sweden, Licentiate thesis* 1998:37, 41 s.
- Gehlin, S., 2002: Thermal Response Test Method, Development and Evaluation. *Luleå University of Technology, Doctoral Thesis* 2002:39, 44 s.
- Gustafsson, O., 1980: Mapa głębokości podłoża gruntowego w południowo-zachodniej Skanii. *Sveriges geologiska undersökning* Ba 28.
- Hartmann, A., Rath, V. & Clauser, C., 2005: Thermal conductivity from core and well log data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42, 1042–1056.
- Henkel, H., Bergman, B., Stephansson, O. & Lindström, M., 2004: Björkö projekty energetyczne - Raport końcowy dla badań geologiczno-naukowych. *Kungliga Tekniska högskolan, TRITA-LWR.REPORT* 3010, 61 s.
- Henning, A. & Limberg, A., 2012: Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 19.1, 81–92.
- Horai, K., 1971: Thermal conductivity of rockforming minerals. *Journal of Geophysical Research* 76, 1278–1308.
- Horai, K. & Simmons, G., 1969: Thermal conductivity of rockforming minerals. *Earth and Planetary Science Letters* 6, 359–368.
- Horai, K. & Baldrige, W.S., 1972: Thermal conductivity of nineteen igneous rocks, II: Estimation of the thermal conductivity of rock from the mineral and chemical compositions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 5, 157–166.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. & Blum, P., 2013: Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914–925
- Kalskin Ramstad, R., Tiarks, H. & Midttømme, K., 2008: *Ground source energy – Thermal conductivity map in the Oslo region*. NGU presentation 33 Inter. Geol. Congress, Oslo, unpubl.
- Karlqvist, L., De Geer, J., Johnson, J., Thunholm, B., Lilja, A., Fagerlind, T. & Olsson, T., 1982: Przykłady działań w sektorze energetycznym w SGU. *Sveriges geologiska undersökning Raporty i wiadomości* 29, 83 s.
- Kiehl, J.T. & Trenberth, K.E., 1997: Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 197–208.
- Lachenbruch, A.H., Sass, J.H., Marshall, B.V. & Moses Douglas Jr., T.H., 1982: Permafrost, Heat Flow, and the Geothermal Regime at Prudhoe Bay, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 87, 9301–9316.
- Lilja, L., 1981: Zaburzenia warunków temperaturowych w podłożu skalnym przy wierceniu udarowym. *Sveriges geologiska undersökning Raporty i wiadomości* 23, 38 s.
- Persson, L., Sträng, M. & Antal, I., 2001: Mapa podłoża skalnego 101 Sztokholm, skala 1: 100 000 *Sveriges geologiska undersökning* Ba 60.
- Popov, Yu.A., Pribnow, D., Sass, J., Williams, C. & Burkhardt, H., 1999: Characterisation of rock thermal conductivity by highresolution optical scanning, *Geothermics* 28, 253–276.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. & Lefebvre, R., 2011: A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Ground Water* 49, 932–945.
- Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellström, G. & Nilsson, G., 2001: Systemy ogrzewania i chłodzenia z gruntu - opis stanu bieżącego. *SGI Varia* 511, 240 s.
- Rybach, L., 2012: Shallow Systems: Geothermal Heat Pumps. In Sayigh A, (ed.) *Comprehensive Renewable Energy* 7, 187–205, Oxford: Elsevier.

- Rybach, L. & Sanner, B., 2000: Groundsource heat pump systems – The European experience. *GeoHeatCenter Bull.* 21/1, 16–26.
- Rybach, L. & Eugster, W.J., 2002: Sustainability aspects of geothermal heat pumps. *Proc. 27th workshop on Geothermal reservoir Engineering, Stanford, SGP-TR-171*, 55–64.
- Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J. & Gehlin, S., 2005: *Thermal response test – current status and world-wide application*. Proc. World Geothermal Congress, Antalya, paper 1436, 9 s.
- Schön, J., 2004: *Physical properties of rocks*. Elsevier, Amsterdam. 583 s.
- Schwarz, G., Göransson, M., Thunholm, B. & Förster, A., 2010: *Mapping thermal conductivity of the Swedish bedrock*. 29th Nordic Geological Winter Meeting, Oslo. NGF abstracts and proceedings 1, s. 177.
- SGU, 2008: *Normbrunn-07, Wiercenie studni do pozyskiwania energii i wody - wytyczne. Standardowa procedura odwiertów geotermalnych (wody gruntowe i geotermia płytka)*. Sveriges geologiska undersökning 40 s.
- Signorelli, S., 2004: *Geoscientific investigations for the use of shallow low-enthalpy systems*. Dissertation Department of Mechanical and Process Engineering Zürich, ETH No. 15519, 159 s.
- Sivhed, U., 1991: A preQuaternary, postPalaeozoic erosional channel deformed by strike-slip faulting, Scania, southern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 113, 139–143.
- Sundberg, J., Thunholm, B. & Johnson, J., 1985: Właściwości przewodzenia ciepła w szwedzkim podłożu skalnym. *Bygghälsningsrådet R97:1985*, 100 s.
- Sundberg, J., Wrafter, J., Back, P. E. & Rosén, L., 2008: Thermal properties Laxemar – site descriptive modeling – SDMSite Laxemar. *SKB R-08-61*, 307 s.
- Sundberg, J., Back, P. E., Ericsson, L.O. & Wrafter, J., 2009: Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 1023–1028.
- Svenskt Geoenergicentrum, 2015: (Szwedzkie centrum geoenergetyki) Wytyczne dotyczące testu reakcji termicznej. <<http://www.geoenergicentrum.se>>
- Wallroth, T., Eliasson, T. & Sundquist, U., 1999: Hot dry rock research experiments at Fjällbacka Sweden. *Geothermics* 28, 617–625.