

Artykuł naukowy

**Zastosowanie wolnego oprogramowania i otwartych danych
w analizie przestrzennej systemu awaryjnego zaopatrzenia
w wodę pitną na przykładzie miasta Cottbus/Chóśebuz (Niemcy)**

Application of free software and open data in the spatial analysis of an
emergency drinking water supply system on the example of the city of
Cottbus/Chóśebuz (Germany)

Magdalena Klich¹, Piotr Cichociński², Konrad Thürmer³

¹Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie, Weimar, Niemcy

²Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków, Polska

³Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Niemcy

Abstract

In the Federal Republic of Germany, emergency drinking water supply is provided by 4,800 independent wells distributed throughout the country, from which local residents can draw water on their own. The assumed maximum distance from the residence to the well is 500 to 2,000 meters. Areas to be supplied by individual emergency wells are traditionally delineated by drawing circles around them on a map. The paper attempts to examine, using a selected example, whether the functionality of free GIS software and the available open spatial data allow for a more precise determination of the areas served by individual wells, or, if none is available, to suggest potential locations for tanker trucks. Conducted analyses confirmed the assumptions made at the outset.

Słowa kluczowe: analizy sieciowe, dostępność studni, jakość danych, macierz kosztów, najkrótsza droga, obszar obsługiwany

Keywords: network analysis, wells accessibility, data quality, cost matrix, shortest way, service area

Wprowadzenie

W Republice Federalnej Niemiec zaopatrzenie ludności w wodę w ramach usług użyteczności publicznej (Wasserhaushaltsgesetz, 2009) jest jednym z ustawowych obowiązków nałożonych na gminy (Grundgesetz, 1949), przy czym gminy mogą realizować to zadanie samodzielnie lub przekazać je przedsiębiorstwom wodociągowo-kanalizacyjnym. Woda pitna musi mieć wymaganą jakość, ilość oraz wystarczające ciśnienie (TrinkwV, 2016). W sytuacjach awaryjnych należy wykorzystać alternatywne sposoby zaopatrzenia – zastosowane środki różnią się w zależności od rodzaju i pochodzenia zagrożenia oraz powinny być opisane i określone w planie działania opracowanym zgodnie z (DVGW, 2018). W szczególności przewiduje się korzystanie z zastępczego źródła wody pitnej. Awaryjne zaopatrzenie w wodę pitną zapewnia 4800 niezależnych studni rozmieszczonych na terenie całego kraju (Langenbach i Fischer, 2008), w których ludność może samodzielnie zaopatrywać się w wodę.

Dostępność studni awaryjnych dla okolicznych mieszkańców zależy od wielu czynników, takich jak: poziom wód gruntowych, istniejąca infrastruktura, zapotrzebowanie na wodę (liczba i rodzaj mieszkańców) oraz odległość od miejsca zamieszkania do studni. Założenia i wytyczne awaryjnego zaopatrzenia w wodę dyktują racje wody oraz czas jej poboru: 15 godzin na dobę. Maksymalna odległość od miejsca zamieszkania do studni wynosi od 500 do 2000 m (Langenbach i Fischer, 2008). Do tej pory wyznaczanie obszarów do zaopatrzenia przez studnie awaryjne przeprowadzano za pomocą zataczania na mapie okręgów, których środki stanowiły studnie. W razie awarii mieszkańcy wyznaczonych obszarów powinni zaopatrywać się w studni awaryjnej stanowiącej środek danego okręgu.

Jednakże zastosowanie metody zakładającej ruch w linii prostej powoduje przeszacowanie liczby mieszkańców mogących korzystać z danej studni (D'Orso i Migliore, 2020). Stanowczo lepsze przybliżenie sposobu poruszania się pieszo zapewniają narzędzia analityczne uwzględniające przemieszczanie się po ścieżkach, chodnikach i wzdłuż ulic (Gutiérrez i García-Palomares, 2008). W ostatnich latach opublikowano wiele prac poświęconych badaniu dostępności miejsc schronienia w sytuacjach kryzysowych z użyciem funkcji analiz sieciowych oprogramowania GIS (m.in. Dewi, 2010, Unal i Uslu, 2016, Yao i in., 2021), natomiast autorom nie udało się znaleźć żadnego artykułu poruszającego zagadnienie weryfikacji współcześnie dostępnymi narzędziami założeń funkcjonowania systemów awaryjnego zaopatrzenia w wodę pitną.

Zakres i obszar badań

Mając powyższe na uwadze podjęto próbę sprawdzenia, czy funkcjonalność wolnego oprogramowania GIS oraz dostępne otwarte dane przestrzenne pozwalają na bardziej precyzyjne wskazanie obszarów zaopatrzenia w wodę ze studni awaryjnych, a w przypadku ich braku, zasugerowanie potencjalnych miejsc dla autocystern, a także wytyczenie najkrótszych tras ruchu pieszego od miejsca zamieszkania do miejsc poboru wody. W szczególności zweryfikowano, czy możliwe jest zrealizowanie następujących zadań:

- sprawdzenie, czy zapotrzebowanie mieszkańców na wodę pitną na wybranym obszarze jest zaspokojone;
- wskazanie punktów adresowych leżących w obszarze zaopatrzenia w wodę (obszarze obsługiwanym) dla poszczególnych studni przy uwzględnieniu założeń poboru wody (wydajność studni, zapotrzebowanie na wodę wynikające z liczby i charakteru użytkowników);
- wytyczenie najkrótszych odległości w ruchu pieszym od punktów adresowych do studni;
- w przypadku braku studni, wskazanie miejsc postoju cystern zaopatrujących mieszkańców w wodę oraz określenie wymaganej objętości wody;
- wskazanie najkrótszych tras pieszych od punktów adresowych do miejsc wyznaczonych dla cystern.

Badania przeprowadzono na terenie miasta Cottbus/Chósebus (pol. Chociebuż), położonego we wschodnich Niemczech w kraju związkowym Brandenburgia, liczącego 100 tysięcy mieszkańców i posiadającego 46 studni awaryjnych. Ze względu na przewidywaną czasochłonność prac obszar analizy ograniczono do dwóch dzielnic, które uznano za najlepiej odpowiadające charakterystyce miasta: Spremberger Vorstadt i Kahren. Spremberger Vorstadt jest dzielnicą położoną w centrum, charakteryzującą się gęstą zabudową. Liczba punktów adresowych w jej obrębie wynosi 1588, a liczba mieszkańców to 15365. Zapotrzebowanie na wodę mieszkańców tej dzielnicy wynosi 316570 litrów na dzień. W dzielnicy znajduje się 8 studni, z czego dwie nie działają i w związku z tym zostały pominięte w analizie. Z kolei dzielnica Kahren jest dzielnicą peryferyjną i charakteryzuje się zabudową zlokalizowaną wzdłuż głównych ulic. Liczba punktów adresowych w tej dzielnicy wynosi 498, liczba mieszkańców to 1236. Zapotrzebowanie na wodę mieszkańców Kahren wynosi 18540 litrów w ciągu dnia. W dzielnicy znajduje się jedna studnia, która nie działa i dlatego została pominięta w analizie.

Metodyka badań

Wszystkie analizy zostały wykonane w programie QGIS (QGIS.org, 2022), który można uznać za reprezentatywny przykład wolnego oprogramowania (Michalak, 2007) w zakresie systemów informacji przestrzennej (GIS). Do wyróżniających go cech można zaliczyć obsługę większości powszechnie stosowanych formatów danych, dużą liczbę wbudowanych narzędzi służących przetwarzaniu i analizowaniu danych przestrzennych oraz łatwą rozbudowę funkcjonalności przez system wtyczek (ang. *plug-in*). Założono, że pomiędzy miejscem zamieszkania a studnią mieszkańcy będą poruszać się pieszo po ulicach i chodnikach. Dlatego bazując na wcześniejszych doświadczeniach (Cichociński i Dębińska, 2012), posłużono się następującymi narzędziami analiz sieciowych:

- „OD (Origin-Destination) Matrix” (Macierz kosztów początek-cel) z wtyczki QNEAT3 (QGIS Network Analysis Toolbox 3);
- „Najkrótsza droga” z grupy „Wektor – analiza sieciowa” Algorytmów Processingu.

Dodatkowo wykorzystano narzędzia analiz przestrzennych w modelu wektorowym: złączenie atrybutowe, otoczka wklęsła, środek ciężkości.

Dane dotyczące przebiegu ulic oraz ścieżek ruchu pieszego pobrano z OpenStreetMap (OSM) – obejmującego cały świat zbioru danych przestrzennych, tworzonego i edytowanego przez zainteresowane osoby (Haklay i Weber, 2008) i dostępnego do stosowania przez każdego chętnego bezpłatnie i do dowolnych celów. Istotne jest jedynie spełnienie dwóch warunków: wskazanie OSM jako źródła danych i rozpowszechnianie zmodyfikowanych danych na takiej samej licencji (OpenStreetMap Foundation, 2021).

Ponadto pozyskano następujące dane:

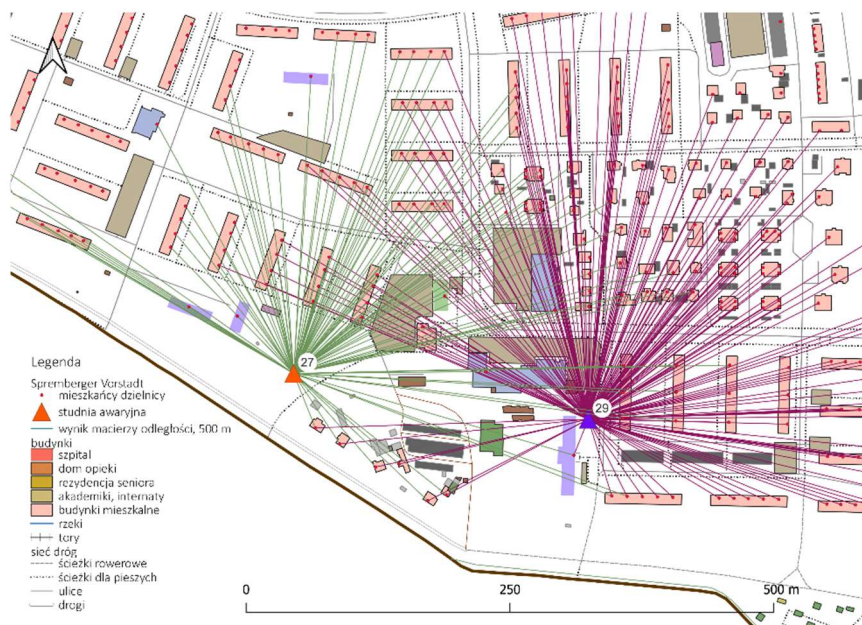
- Punkty adresowe, opisane atrybutami: współrzędne geograficzne, nazwa ulicy, kod pocztowy, numer domu, nazwa dzielnicy, liczba mieszkańców. Otrzymane z Urzędu Miasta Cottbus/Chóšebuz;
- Warstwa budynków, pobrana z Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) – niemieckiego urzędowego systemu informacyjnego katastru nieruchomości;
- Zeskanowane akta, zawierające informacje o studniach: współrzędne geograficzne, parametry wydajności, parametry stanu. Dane te zostały ręcznie wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego, a następnie przekształcone do postaci zbioru danych przestrzennych.

Jak zauważył Cichociński (2012) baza danych OSM budowana jest przez wolontariuszy, nie są sformułowane żadne plany jej systematycznego rozwoju oraz brak

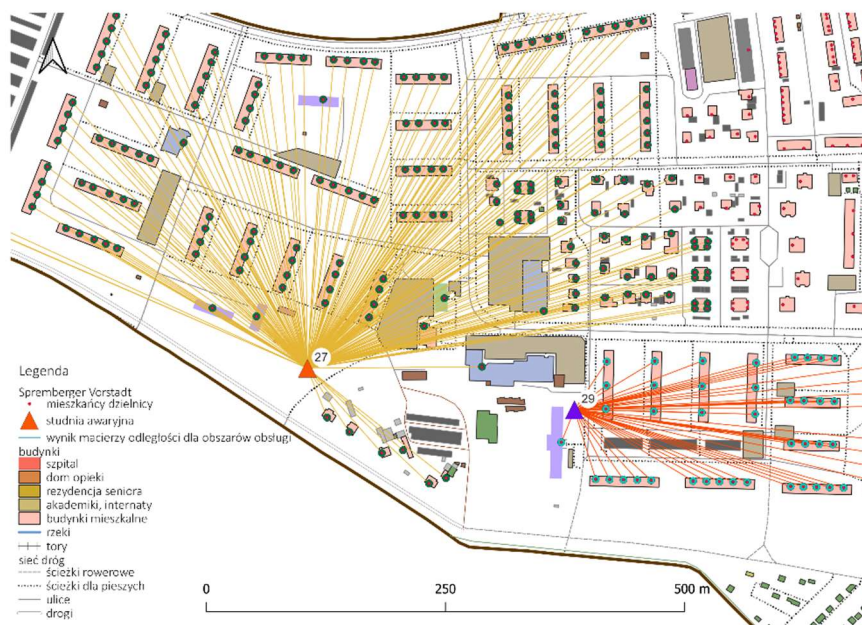
jest odgórnej kontroli jakości. Dlatego przed przystąpieniem do analiz konieczna była weryfikacja i korekta zgromadzonych danych:

- Z danych OpenStreetMap wyselekcjonowano dopuszczalne dla ruchu pieszego drogi oraz chodniki, a także parkingi jako potencjalne miejsca postoju cystern;
- Uzupełniono dane o przebiegu ścieżek dla pieszych;
- Sprawdzono poprawność topologiczną danych sieciowych i skorygowano występujące błędy: niepoprawną geometrię, wiszące węzły, nakładające się i przecinające obiekty liniowe;
- Do tabeli atrybutów punktów adresowych dodano informację o charakterze obiektu (szpital, dom opieki, budynek mieszkalny), od którego zależą racje wody dla mieszkańców i na tej podstawie wyznaczono zapotrzebowanie na wodę.

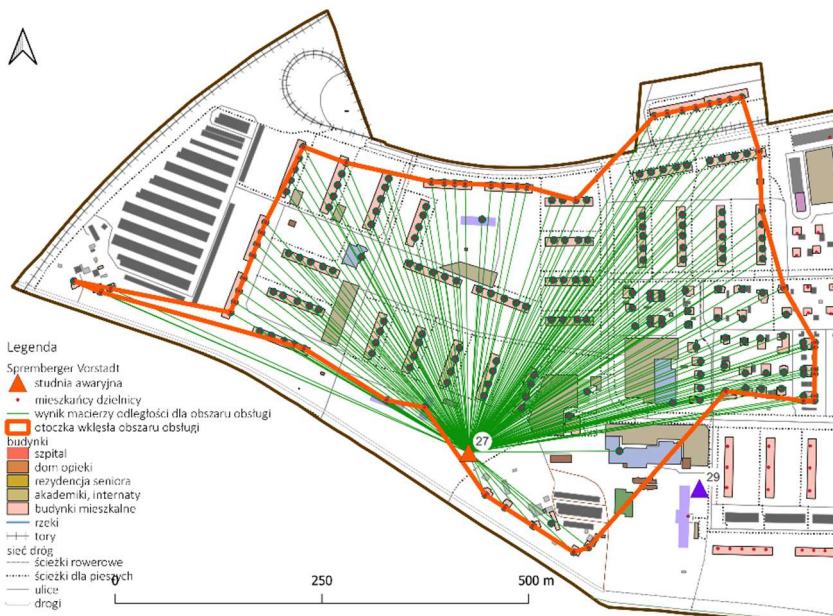
Dysponując zweryfikowanymi danymi można było dla każdej studni w dzielnicy Spremberger Vorstadt wyznaczyć jej obszar obsługiwany. Posłużono się narzędziem „OD Matrix”, które określało najmniejsze odległości mierzone wzdłuż ulic i chodników od poszczególnych punktów adresowych do studni. Wynikiem był zbiór odcinków łączących punkty adresowe ze studnią, z odległością zapisaną w postaci atrybutu. Do tabeli atrybutów wyniku macierzy odległości dołączano z tabeli punktów adresowych kolumnę z informacją o zapotrzebowaniu na wodę. Następnie w manualnie przeprowadzanej procedurze wybierano kolejno punkty adresowe leżące w odległościach do 500 (Rys. 1), 600, 700 i 800 m od studni, sprawdzano ich sumaryczne zapotrzebowanie na wodę, po czym metodą prób i błędów dochodzono do optymalnej wielkości obszaru obsługiwanego, w zależności od parametrów hydraulicznych studni (dostępności wody), sąsiedztwa innych studni, ich wydajności oraz zapotrzebowania na wodę (Rys. 2). Ostateczny wielobok reprezentujący obszar obsługiwany uzyskiwano tworząc otoczkę wklęsłą (ang. *concave hull*) na podstawie końców linii wyróżnionych we wcześniejszym kroku (Rys. 3). Ostatnim etapem było wytyczenie najkrótszych dróg do studni dla poszczególnych punktów adresowych mieszczących się w jej obszarze obsługiwanym. W tym celu wykorzystano narzędzie „Najkrótsza droga” (Rys. 4).



Rys. 1. Wynik działania narzędzia „OD Matrix”. Punkty adresowe oddalone maksymalnie o 500 m od studni nr 27 i 29 (opracowanie własne w programie QGIS)



Rys. 2. Wyznaczanie obszaru obsługiwanego dla studni awaryjnych nr 27 i 29

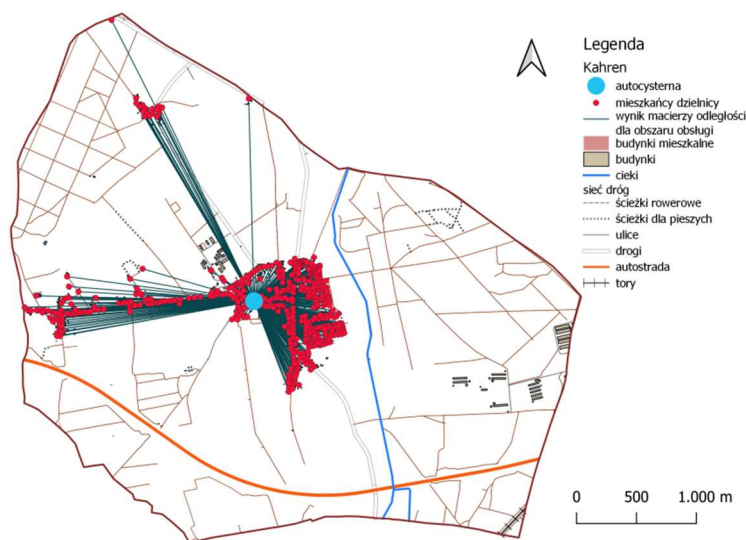


Rys. 3. Oznaczenie obszaru obsługiwanego za pomocą narzędzia „Otoczka wklęsła”

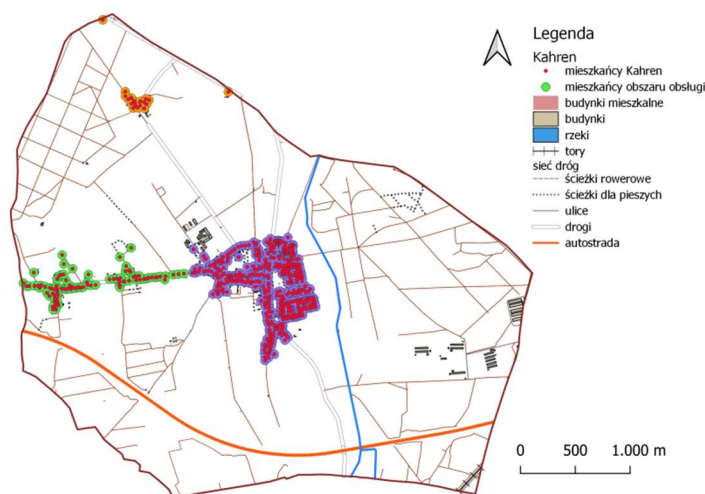


Rys. 4. Najkrótsze drogi między punktami adresowymi obszaru zaopatrzenia, a studnią nr 27

Ponieważ w dzielnicy Kahren nie ma sprawnych studni awaryjnych, zaopatrzenie w wodę mieszkańców powinno odbywać się za pomocą autocystern, dla których należało określić miejsca postoju. W celu wyznaczenia miejsca o największej liczbie odbiorców i mając na uwadze niewielką liczbę mieszkańców, wyznaczono geometryczny środek ciężkości dla zbioru wszystkich punktów adresowych w tej dzielnicy, po czym wskazano najbliższe leżące miejsca parkingowe (łatwo osiągalne dla autocysterny). Za pomocą narzędzia „OD Matrix” obliczono odległości wzdłuż ulic od wszystkich punktów adresowych w Kahren do wyznaczonego miejsca parkingowego (Rys. 5), a z użyciem narzędzia „Najkrótsza droga” wytyczono najkrótsze trasy. Ze względu na rozproszenie punktów adresowych (dla 102 punktów odległość do autocysterny wynosiła powyżej 2000 m, a maksymalna odległość to 3129 m) uznano, że dostarczanie wody przez jedną cysternę będzie niewystarczające, dlatego ostatecznie zaproponowano trzy miejsca postojowe cystern – Kahren Zachód, Północ i Centrum, odpowiadające grupom skupionych budynków (Rys. 6).



Rys. 5. Pierwsza propozycja lokalizacji autocysterny w dzielnicy Kahren, w geometrycznym środku ciężkości zabudowy (opracowanie własne w programie QGIS)



Rys. 6. Ostateczny podział punktów adresowych w dzielnicy Kahren pomiędzy trzy autocysterny (opracowanie własne w programie QGIS)

Dyskusja wyników i wnioski

Dla wszystkich studni awaryjnych dzielnicy Spremberger Vorstadt wyznaczono obszary obsługiwane oraz liczbę zawartych w nich punktów adresowych i mieszkańców, a także wskazano procentowy udział zapotrzebowania na wodę w stosunku do zasobów danej studni. W obszarze obsługiwanym jednej ze studni położony jest szpital. Dlatego w tym przypadku analiza została przeprowadzona w dwóch wariantach – ze szpitalem oraz bez szpitala. Pozwoliło to wysnuć wniosek, że ze względu na duże zapotrzebowanie na wodę oraz problem z mobilnością pacjentów, w razie sytuacji wyjątkowej szpital musi być zaopatrywany w wodę przez autocysternę.

Również dla dzielnicy Kahren udało się wyznaczyć optymalne miejsca postoju dla autocystern. Tym samym autorzy uznają, że zarówno wolne oprogramowanie GIS, jak i otwarte zbiory danych przestrzennych (w szczególności OpenStreetMap) mogą być z powodzeniem stosowane do analizowania i optymalizowania systemu awaryjnego

zaopatrzenia w wodę pitną. W trakcie badań dostrzeżono jednak pewne niedoskonałości użytych danych i narzędzi:

- Narzędzie „OD Matrix” wymaga, żeby dane określające lokalizacje były typu Punkt, a nie Wielopunkt (ang. *Multipoint*). W przeciwnym wypadku przerywa działanie z komunikatem o błędzie, który jednak nie wskazuje wystarczająco precyzyjnie na jego przyczynę;
- W danych dla analiz sieciowych występowały błędy topologiczne, a sprawdzenie kompletności i uzupełnienie brakujących obiektów wymagało znajomości obszaru badań;
- Autorzy potwierdzają spostrzeżenie Lewandowicz i Fliska (2017), że narzędzia wektorowych analiz sieciowych przyjmują teren pomiędzy drogami jako jednorodny i tak samo dostępny. Tym samym nie uwzględniają barier takich jak rzeki, czy tory kolejowe, które zwykle uniemożliwiają przejazd lub przejście. Proponowane rozwiązanie tego problemu wymagałoby jednak gruntownego przebudowania tych narzędzi;
- Analizy z użyciem dostępnych narzędzi okazały się bardzo czasochłonne, wymagając wielokrotnego powtarzania czynności i często wizualnej oceny wyników pośrednich. Wskazuje to, że dalsze badania powinny iść w kierunku automatyzacji przynajmniej części zadań w tego typu analizach oraz opracowania i implementacji odpowiednich algorytmów optymalizacyjnych.

Podziękowania

Praca współfinansowana z subwencji Ministerstwa Edukacji i Nauki dla AGH Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz przez Miasto Cottbus/Chóśebuz.

Literatura (References)

- Cichociński, P., 2012: Ocena przydatności OpenStreetMap jako źródła danych dla analiz sieciowych. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, 10(7 (57)), 15-24.
- Cichociński, P., Dębińska, E., 2012: Badanie dostępności komunikacyjnej wybranej lokalizacji z wykorzystaniem funkcji analiz sieciowych. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, 10(4 (54)), 41-48.
- Dewi, R. S., 2010: A GIS-based approach to the detection of evacuation shelter buildings and routes for tsunami risk reduction: A case study of Cilacap Coastal Area, Indonesia (Master's thesis, University of Twente).
- D'Orso, G., Migliore, M., 2020: A GIS-based method for evaluating the walkability of a pedestrian environment and prioritised investments. *Journal of transport geography*, 82, 102555.

- DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) W 1020:2018-03 Empfehlungen und Hinweise für den Fall von Abweichungen von Anforderungen der Trinkwasserverordnung; Maßnahmeplan und Handlungsplan.
- (Wasserhaushaltsgesetz) Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist.
- Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23.05.1949 (BGBl. S. 1), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 28. Juni 2022 (BGBl. I S.968) geändert worden ist.
- Gutiérrez, J., García-Palomares, J. C., 2008: Distance-measure impacts on the calculation of transport service areas using GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(3), 480-503.
- Haklay, M., Weber, P., 2008: Openstreetmap: User-generated street maps. *IEEE Pervasive computing*, 7(4), 12-18.
- Langenbach, M., Fischer, P., 2008: Trinkwasser-Notbrunnen in Deutschland. *bbr-Fachmagazin für Brunnen-und Leitungsbau*, 11.
- Lewandowicz, E., Flisek, P., 2017: Dostępność komunikacyjna w analizach sieciowych w przestrzeniach heterogenicznych. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, 15(4 (79)), 375-389.
- Michalak, J., 2007: Otwarte oprogramowanie i otwarte dane w geomatyce. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics*, 5(2), 11-20.
- OpenStreetMap Foundation, 2021: Licence. <https://wiki.osmfoundation.org/wiki/Licence>
- QGIS.org, 2022: QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- (TrinkwV) Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4343) geändert worden ist.
- Unal, M., Uslu, C., 2016: GIS-BASED ACCESSIBILITY ANALYSIS OF URBAN EMERGENCY SHELTERS: THE CASE OF ADANA CITY. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Yao, Y., Zhang, Y., Yao, T., Wong, K., Tsou, J. Y., Zhang, Y., 2021: A GIS-based system for spatial-temporal availability evaluation of the open spaces used as emergency shelters: the case of Victoria, British Columbia, Canada. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), 63.

Streszczenie

W Republice Federalnej Niemiec zaopatrzenie w wodę pitną w sytuacjach awaryjnych zapewnia 4800 niezależnych studni rozmieszczonych na terenie całego kraju, z których okoliczni mieszkańcy mogą samodzielnie pobierać wodę. Zakładana maksymalna odległość od miejsca zamieszkania do studni wynosi od 500 do 2000 m. Obszary do zaopatrzenia przez poszczególne studnie awaryjne tradycyjnie wyznaczane są za pomocą zataczania wokół nich okręgów na mapie. W pracy podjęto próbę zbadania na wybranym przykładzie, czy funkcjonalność wolnego oprogramowania GIS oraz dostępne otwarte dane przestrzenne pozwalają na bardziej precyzyjne wskazanie obszarów

obsługiwanych przez poszczególne studnie, a w przypadku ich braku, zasugerowanie potencjalnych miejsc dla autocystern. Przeprowadzone analizy potwierdziły postawione na wstępie założenia.

Dane autorów / Authors details:

dr Magdalena Klich

magdalena.klich@iwsoc.de

dr hab. inż. Piotr Cichociński

ORCID 0000-0002-8633-1235

Piotr.Cichocinski@agh.edu.pl

dr.-Ing. Konrad Thürmer

Konrad.Thuermer@b-tu.de

Przesłano / Received	16.11.2022
Zaakceptowano / Accepted	20.12.2022
Opublikowano / Published	29.12.2022



© Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).