

Strefy planowania awaryjnego dla jądrowej produkcji ciepła: wzorce z Chin, Finlandii i Szwajcarii a droga do dekarbonizacji polskich sieci ciepłowniczych

Emergency planning zones for nuclear heat generation: models from China, Finland, and Switzerland, and the road to decarbonization of Polish district heating networks

Bartosz Skura
Politechnika Warszawska

Streszczenie: Artykuł analizuje kwestię stref planowania awaryjnego (EPZ) wokół elektrowni jądrowych wykorzystywanych do produkcji ciepła sieciowego. Omawiane są trzy praktyczne modele regulacyjne: chiński, fiński i szwajcarski. Zestawienie tych przykładów pokazuje, jak odmienne systemy prawne łączą wymogi bezpieczeństwa radiologicznego z potrzebami miejskich sieci ciepłowniczych. Studium wybranych przypadków wskazuje, iż zarówno duże bloki energetyczne, jak i małe reaktory modułowe (SMR) mogą zasilać sieci ciepłownicze, nie powodując konieczności zmiany w podejściu do ustalania stref planowania awaryjnego, jeśli czynnik grzewczy pobierany jest z nieaktywnego obiegu. W odniesieniu do Polski autor wskazuje, że planowana elektrownia jądrowa na wybrzeżu, wsparta odpowiednią magistralą przesyłową, mogłaby zasilić ciepłem aglomerację Trójmiasta, a równoległy program SMR-ów otworzyłby drogę do niskoemisyjnego ogrzewania miast śródlądowych. Wykorzystanie energii jądrowej w ciepłownictwie może się stać jednym z najszybszych i najbezpieczniejszych sposobów głębokiej dekarbonizacji polskich sieci ciepłowniczych.

Słowa kluczowe: Bezpieczeństwo jądrowe, ciepłownictwo, dekarbonizacja, kogeneracja, SMR, strefy planowania awaryjnego.

Abstract: The article examines the issue of emergency planning zones (EPZs) around nuclear power plants used for district heating. It discusses three practical regulatory models: Chinese, Finnish, and Swiss. A comparison of these examples shows how different legal frameworks reconcile radiological safety requirements with the needs of urban heating networks. Case studies show that both large power reactors and small modular reactors (SMRs) can supply district heating networks without requiring changes to the way EPZs are set, provided the heat carrier is drawn from a non-radioactive secondary circuit. Concerning Poland, the author points out that the planned coastal nuclear power plant supported by an appropriate transmission pipeline could heat the Tri-City area and that a parallel SMR programme would pave the way for low-emission heating in inland cities. The use of nuclear power in district heating could become one of the fastest and safest ways to deeply decarbonize Poland's district heating networks.

Keywords: Nuclear safety, district heating, decarbonization, cogeneration, SMR, emergency planning zones.

1. Wstęp

Wraz z przyspieszeniem dekarbonizacji światowej energetyki uwaga przesuwana się z samej produkcji energii elektrycznej na ogrzewanie miast, które w wielu krajach, w tym także w Polsce, wciąż zależy od węgla i gazu [1]. **Jądrowa produkcja ciepła oraz kogeneracja** (jednoczesne wytwarzanie ciepła sieciowego i energii elektrycznej w reaktorach jądrowych) mogą tu odegrać kluczową rolę, gdyż są w stanie zapewnić **stabilne i bezemisyjne źródło energii** nawet w pobliżu gęstej zabudowy miejskiej. Aby wizja jądrowych ciepłowni mogła zyskać społeczną akceptację, musi jej towarzyszyć gwarancja najwyższych standardów bezpieczeństwa. Kluczową rolę odgrywają tu **strefy planowania awaryjnego** (ang. *Emergency Planning Zones*, EPZ). Są to wyznaczone obszary wokół obiektu jądrowego, w których w razie najpoważniejszej awarii można szybko wdrożyć środki ochronne ludności. Doświadczenia z wykorzystaniem energii jądrowej do celów ciepłowniczych nie są już wyłącznie koncepcją akademicką. Na świecie działa dziś kilkanaście obiektów, które dostarczają ciepło sieciowe mieszkańcom miast. W niniejszym artykule przeanalizowano przypadki trzech państw: Chin, Finlandii oraz Szwajcarii, ponieważ reprezentują one odmienne modele regulacyjne, skalę projektów oraz poziom dojrzałości technologicznej, dostarczając zarazem najbardziej kompletne dane operacyjne potrzebne do oceny ryzyka radiologicznego. Analiza zagranicznych doświadczeń pozwala odpowiedzieć na dwa kluczowe pytania z polskiej perspektywy. Po pierwsze, czy wdrożenie jądrowych źródeł ciepła, zarówno w formie kogeneracji, jak i dedykowanych ciepłowni jądrowych, wymaga zmiany podejścia do wyznaczania stref planowania awaryjnego. Po drugie, jakie korzyści systemowe odniesie krajowe ciepłownictwo, gdy wyeksploatowane elektrociepłownie węglowe zostaną zastąpione niskoemisyjnymi reaktorami.

2. Zasady wyznaczania stref planowania awaryjnego w Chinach

2.1. Podstawy prawne i techniczne

Ustalanie stref planowania awaryjnego w Chinach odbywa się na podstawie krajowego prawa i norm technicznych. Najważniejsze regulacje to m.in. Ustawa o bezpieczeństwie jądrowym [2], która nakłada obowiązek przygotowania planów awaryjnych oraz powołania krajowych i lokalnych komisji ds. awaryjnego reagowania. Dopełnieniem są normy państwowe, zwłaszcza GB 6249-2025 [3] oraz GB/T 17680.1-2008 [4], które precyzują wymagania ochrony radiologicznej na etapie projektowania i eksploatacji elektrowni jądrowych. Dokumenty te zobowiązują operatora i władze do opracowania planów awaryjnych, wyznaczenia stref ochronnych i określenia limitów dawek, a także definiują pojęcie stref planowania awaryjnego wraz z metodami ich wyznaczania, tworząc podstawę do przygo-

towania planów reagowania kryzysowego przy elektrowniach jądrowych. Ponadto funkcjonuje Krajowy plan reagowania na awarie jądrowe [5], który określa ogólnokrajowy system organizacyjny i zasady postępowania w sytuacjach awaryjnych.

2.2. Podział stref planowania awaryjnego

Chiński system planowania awaryjnego dzieli otoczenie elektrowni na strefy planowania awaryjnego ze względu na potencjalne drogi narażenia. Wyróżnia się przede wszystkim: **strefę narażenia na chmurę radioaktywną** (z dalszym podziałem na strefę wewnętrzną i zewnętrzną) oraz **strefę ograniczonego spożycia**, związaną z ryzykiem narażenia przez skażoną żywność i wodę pitną [4, 6]. Poniżej przedstawiono charakterystykę tych stref.

2.2.1. Strefa narażenia na chmurę radioaktywną

Dla chińskich reaktorów zaleca się, aby całkowity promień strefy narażenia na chmurę radioaktywną mieścił się w zakresie około **7–10 km** od elektrowni. Strefa ta dzielona jest na część **wewnętrzną** (bliższą elektrowni) o promieniu typowo **3–5 km** oraz **zewnętrzną** sięgającą do wspomnianych 7–10 km. W tym obszarze planuje się natychmiastowe działania ochronne na wypadek awarii: przede wszystkim ewakuację lub schronienie ludności, dystrybucję jodu, a także kontrolę spożycia żywności i wody pochodzącej z obszaru skażenia. Celem jest ochrona ludności przed ostrą ekspozycją z chmury w pierwszych godzinach i dniach po zdarzeniu. Podział na strefę wewnętrzną i zewnętrzną wynika z różnicy w zalecanych działaniach: w wewnętrznej części przewiduje się najbardziej zdecydowane środki (np. szybką ewakuację), w zewnętrznej zaś dodatkowe środki ostrożności zależne od skali uwolnienia (np. schronienie, przygotowanie do ewakuacji w razie pogorszenia sytuacji).

2.2.2. Strefa ograniczonego spożycia

Strefa ograniczonego spożycia obejmuje obszar położony dalej od elektrowni; najczęściej wyznacza się ją w promieniu **30–50 km**, a dokładny zasięg określa się na podstawie lokalnych warunków i szczegółowych analiz. Strefa ta służy zapewnieniu ochrony ludności przed długotrwałym narażeniem wskutek spożycia skażonych produktów rolnych, żywności, wody pitnej czy pasz, które mogą ulec zanieczyszczeniu opadem promieniotwórczym po awarii. Planuje się w niej środki takie jak kontrola i zakaz wprowadzania do spożycia żywności i wody pochodzących z obszaru skażonego, monitoring radiologiczny żywności oraz, w razie przekroczenia wartości bezpiecznych, ewentualne przesiedlenie ludności lub zakaz upraw.

2.2.3. Wyznaczanie granic stref planowania awaryjnego

Definicja zasięgu stref jest ściśle powiązana z progami dawek, przy których w sytuacji awaryjnej podejmowane są działania ochrony ludności. Zarówno standardy krajowe,

jak i wytyczne Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej [7] przewidują ogólne poziomy interwencji radiologicznej, których przekroczenie uzasadnia m.in. ewakuację, ukrycie się czy podanie preparatów z jodem. W Chinach odwołano się do tych wartości w normie GB 18871–2002 [8] przy wyznaczaniu EPZ. Obliczone dawki porównuje się z ogólnymi poziomami interwencji określonymi w tym standardzie. Zasada jest następująca: promień EPZ powinien być tak dobrany, by poza nim, nawet w razie najcięższej awarii, dawki nie przekroczyły poziomów wymagających interwencji [9].

Wyznaczenie granic EPZ opiera się na teoretycznych analizach rozprzestrzeniania radionuklidów w atmosferze oraz ocenie potencjalnych konsekwencji radiologicznych. Przy określaniu zasięgu stref planowania awaryjnego chińskie przepisy wymagają przeanalizowania zarówno awarii projektowych, jak i ciężkich awarii zgodnie z normą [4] oraz praktyką analiz probabilistycznych. W praktyce oznacza to rozważenie całego spektrum potencjalnych zdarzeń, od typowych awarii przewidywanych w projekcie po najcięższe możliwe wypadki z poważnym uszkodzeniem rdzenia, stopieniem paliwa i uszkodzeniem obudowy bezpieczeństwa. Celem jest ocena maksymalnych możliwych skutków radiologicznych, nawet jeśli prawdopodobieństwo takich zdarzeń jest bardzo małe.

Przy wyznaczaniu stref planowania awaryjnego w Chinach uwzględnia się również czynniki meteorologiczne, geograficzne i demograficzne. Kształt strefy należy dostosować do rzeźby terenu i dominujących kierunków wiatru: można ją na przykład zwęzić tam, gdzie pasma górskie stanowią naturalną osłonę, oraz poszerzyć w sektorach, w których wiatr sprzyja przenoszeniu zanieczyszczeń na większe odległości. W kierunku dużych miast czy obszarów przemysłowych strefę planowania awaryjnego poszerza się tak, by uwzględnić potencjalnie większą liczbę mieszkańców, natomiast nad obszarami słabo zaludnionymi, takimi jak morze czy pustynia, strefę można zawęzić. Logistyka ewakuacji (drogi, mosty, możliwości przemieszczania ludności) także wpływa na korektę obszaru. EPZ często dopasowuje się do granic administracyjnych lub naturalnych barier tak, by umożliwić sprawną organizację akcji. W praktyce więc strefy przybierają nieraz nieregularny kształt dostosowany do otoczenia [6, 10].

2.3. Dodatkowe strefy wokół elektrowni jądrowej

Oprócz wspomnianych stref planowania awaryjnego chińskie regulacje wyróżniają także strefy dotyczące planowania przestrzennego i bezpieczeństwa fizycznego wokół elektrowni jądrowych. Ich celem jest ograniczenie dostępu do obiektu oraz gęstości zabudowy i zaludnienia w jego sąsiedztwie, jeszcze zanim zajdzie potrzeba uruchomienia działań awaryjnych. Należą do nich **strefa wykluczenia** oraz **strefa ograniczonego planowania** [3, 6, 10].

2.3.1. Strefa wykluczenia

Strefa wykluczenia to obszar bezpośrednio otaczający reaktor, na którym zabroniona jest stała obecność ludności cywilnej. W Chinach wymagane jest, aby promień tej strefy wynosił **co najmniej 500 metrów od reaktora**. Celem strefy wykluczenia jest zapewnienie, że nikt z przypadkowej ludności nie przebywa w bezpośrednim sąsiedztwie reaktora, co podnosi bezpieczeństwo w dwóch wymiarach: podczas normalnej eksploatacji umożliwia skuteczną kontrolę dostępu i minimalizuje narażenie osób postronnych nawet na śladowe emisje, natomiast w razie awarii gwarantuje, że najwyższe dawki promieniowania pojawiają się wyłącznie na terenie kontrolowanym przez operatora, a nie w przestrzeni publicznej. Innymi słowy, przy prawidłowym zaprojektowaniu elektrowni żadna osoba poza terenem zakładu (poza strefą wykluczenia) nie powinna otrzymać dawki przekraczającej dopuszczalne limity podczas najpoważniejszej analizowanej awarii projektowej. Strefa ta pełni również funkcję bufora dla służb; w razie incydentu działania wewnątrz jej granic podejmuje wyłącznie upoważniony personel.

2.3.2. Strefa ograniczonego planowania

Strefa ograniczonego planowania służy ograniczeniu gęstości zaludnienia i działalności w otoczeniu elektrowni, aby ułatwić ewentualną ewakuację oraz zminimalizować skutki radiologiczne awarii. Innymi słowy, jest to obszar podlegający kontroli planistycznej, gdzie nie lokuje się nowych osiedli ani dużych obiektów publicznych mogących skupić znaczną populację. Jej celem jest zapewnienie, że w razie poważnego wypadku liczba osób wymagających ochrony będzie stosunkowo niewielka, a prowadzenie działań ratunkowych wykonalne. Jej promień wynosi **co najmniej 5 km od reaktora**. Dodatkowo, wewnątrz strefy ograniczonego planowania nie mogą się znajdować miasteczka o ludności przekraczającej 10 tys. mieszkańców, a w promieniu do 10 km nie powinno być miast powyżej 100 tys. mieszkańców [3].

2.3.3. Granice dodatkowych stref

Dokładne granice stref wykluczenia i ograniczonego planowania wyznacza się tak, by nawet podczas **awarii projektowych** (o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym 10^{-4} – 10^{-2} /rok) oraz **rozszerzonych warunków projektowych** (o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym 10^{-6} – 10^{-4} /rok) dawki nie przekroczyły poniższych progów:

- Awaria projektowa (może prowadzić do niewielkich uszkodzeń elementów paliwowych, ale pojedyncza awaria nie spowodowałaby utraty funkcjonalności systemów wymaganych do reagowania na awarię) – na granicy strefy wykluczenia dawka efektywna w pierwszych 2 h nie może przekroczyć **5 mSv**; na granicy strefy ograniczonego planowania ta sama wartość 5 mSv nie może zostać przekroczona w czasie trwania wypadku (domyślnie 30 dni).

- Rozszerzone warunki projektowe (zbiór sekwencji awarii poważniejszych niż awarie projektowe, mogący prowadzić do dużych uwolnień materiałów radioaktywnych, ale pojedyncza awaria nie spowodowałaby utraty funkcjonalności systemów wymaganych do reagowania na awarię) – kryteria rosną do **100 mSv** w czasie 2 h dla strefy wykluczenia i 30 dni dla strefy ograniczonego planowania.

3. Kogeneracyjna elektrownia Haiyang

3.1. Lokalizacja geograficzna i administracyjna obiektu

Elektrownia jądrowa Haiyang znajduje się we wschodnich Chinach, w prowincji Shandong, na wybrzeżu Morza Żółtego. Administracyjnie podlega miastu powiatowemu Haiyang w prefekturze Yantai. Obiekt zlokalizowano na nadmorskim półwyspie: reaktory stoją na cyplu otoczonym z trzech stron morzem, co sprzyja bezpieczeństwu i ogranicza liczbę ludności w bezpośrednim sąsiedztwie. Elektrownia znajduje się w odległości **22 km** od centrum miasta Haiyang oraz około **93 km** od dużego miasta Yantai i **107 km** od metropolii Qingdao. Najbliższą niewielką miejscowością jest Liugezhuang, oddalona o około 10 km od elektrowni. Spełniono tym samym rygorystyczne krajowe wymogi lokalizacyjne, które zalecają budowę elektrowni jądrowych z dala od gęsto zaludnionych obszarów. Rzeczywista gęstość zaludnienia w promieniu kilkunastu kilometrów od elektrowni jądrowej Haiyang jest niska, dominują tereny rolnicze i rybackie, bez większych skupisk miejskich [11, 12]. Rysunek 1 przedstawia lokalizację elektrowni Haiyang i pozostałych chińskich elektrowni jądrowych na mapie Chin.

3.2. Struktura i charakterystyka obiektu

Elektrownia Haiyang została zaprojektowana jako duży kompleks energetyczny obejmujący docelowo sześć bloków jądrowych wodno-ciśnieniowych (ang. *Pressurized Water Reactor*, PWR) o mocy rzędu 1000 MWe każdy. Aktualnie eksploatowane są dwa bloki energetyczne w ramach pierwszej fazy inwestycji. Blok 1 i 2 to reaktory AP1000, stanowiące jednostki demonstracyjne amerykańskiej technologii Westinghouse wdrożonej w Chinach. Każdy z tych bloków ma moc netto około 1170 MWe (moc cieplna około 3415 MW). Budowa bloków AP1000 w Haiyang rozpoczęła się pod koniec 2009 roku (blok 1) oraz w połowie 2010 roku (blok 2). Blok 1 osiągnął stan krytyczny w sierpniu 2018 roku. Obecnie trwa faza druga inwestycji. Budowę bloku Haiyang 3 rozpoczęto w lipcu 2022 roku, a bloku Haiyang 4 w kwietniu 2023 roku. Oba te reaktory będą jednostkami typu CAP1000, czyli ulepszoną, lokalną odmianą technologii AP1000 opracowaną przez chińskie instytuty we współpracy z firmą Westinghouse i dostosowaną do krajowego łańcucha dostaw. Kolejnym etapem rozwoju ma być trzecia faza inwestycji, obejmująca budowę bloków Haiyang 5 i 6, również planowanych jako reaktory typu CAP1000. Zgodnie z dostępnymi danymi projektowymi ich realizacja ma się rozpocząć około 2028 roku [12].

3.3. Jądrowy system kogeneracji elektryczności i ciepła

Elektrownia Haiyang to pierwszy w Chinach komercyjny projekt ogrzewania sieciowego za pomocą ciepła z pracy elektrowni jądrowej. W grudniu 2019 roku uruchomiono pilotażowo ogrzewanie około 700 tysięcy m² powierzchni



Rys. 1. Mapa Chin z zaznaczonymi elektrowniami jądrowymi (źródło: World Nuclear Association).

Fig. 1. Map of China with nuclear power plants marked (source: World Nuclear Association).

mieszkalnej [13]. W listopadzie 2020 roku, po udanych próbach, elektrownia rozpoczęła regularne dostawy ciepła do całego miasta Haiyang [14]. Projekt nazwany Warm Nuclear No. 1 był sukcesywnie rozbudowywany w kolejnych latach, na przykład w 2023 roku uruchomiono **23-kilometrowy rurociąg** dostarczający ciepło również do miasta Rushan. W sezonie zimowym 2024/2025 system ogrzewania o mocy cieplnej **1134 MW** pokrywał już **13 mln m²** powierzchni grzewczej, a docelowo moc ma wystarczyć na ogrzanie nawet do **200 mln m²** powierzchni w rejonie Półwyspu Shandong [15, 16].

Ciepło z elektrowni pobierane jest w postaci upustu pary wtórnego obiegu, czyli nieaktywnej pary wytworzonej w wytwornicach pary przez gorącą wodę z obiegu pierwotnego reaktora [17, 18]. Taka para nie zawiera substancji promieniotwórczych, gdyż jest odseparowana od wody reaktorowej barierą wytwornicy pary. Para upuszczana z wtórnego obiegu trafia następnie do specjalnego węzła cieplnego na terenie elektrowni, gdzie stopniowo oddaje ciepło wodzie krążącej w zamkniętym obiegu pośrednim. Ciepło z elektrowni przekazywane jest następnie długim rurociągiem do miasta. Gorąca woda obiegu pośredniego płynie magistralą ciepłowniczą do zewnętrznej stacji wymiany ciepła, zlokalizowanej bliżej odbiorców i będącej już w gestii lokalnego przedsiębiorstwa ciepłowniczego. Tam ciepło może być już przekazane dalej do miejskiego systemu dystrybucji [15].

3.4. Strefy planowania awaryjnego

Zgodnie z decyzją Regionalnego komitetu ds. reagowania awaryjnego w Shandong z 2012 roku strefę narażenia na chmurę radioaktywną przyjęto jako obszar o promieniu **10 km** (w tym wewnętrzną podstrefę **5 km**), a strefę ograniczonego spożycia wyznaczono jako obszar w kształcie koła o promieniu **50 km** od reaktora. Ponadto funkcjonuje strefa wykluczenia (granica lądowa została wyznaczona zgodnie z granicą terenu zakładu, a na morzu przyjęto promień **0,8 km** od reaktora) oraz strefa ograniczonego planowania o promieniu **5 km**. Wewnętrzna strefa narażenia na chmurę radioaktywną, jak i strefa ograniczonego planowania, obejmują jedynie niewielkie wioski i osiedla, natomiast zewnętrzna strefa obejmuje już fragmenty większych skupisk ludności: części miasteczek i dzielnic miasta Haiyang, a także obszarów przemysłowych. Strefa ograniczonego spożycia obejmuje znaczną część północno-wschodniego Shandong. W jej granicach znajduje się prawie całe miasto powiatowe Haiyang, a także obrzeża innych dużych miast [12].

3.5. Porównanie z elektrownią Sanmen

Spośród kilkudziesięciu bloków jądrowych pracujących w Chinach tylko dwa ośrodki eksploatują reaktory typu AP1000. Są to Haiyang w prowincji Shandong oraz San-

men w prowincji Zhejiang [19]. Powstały niemal równolegle, mają identyczną architekturę reaktora oraz podobne poziomy mocy, co czyni je idealną parą do badania wpływu czynników pozareaktorowych na bezpieczeństwo i oddziaływanie elektrowni. Różni je jednak kluczowy element użytkowy: Haiyang od sezonu 2019/2020 wykorzystuje część ciepła odpadowego z obiegów turbiny do zasilania największego w Chinach systemu ciepłowniczego.

Elektrownia Sanmen znajduje się w prowincji Zhejiang, w nadmorskiej części powiatu Sanmen (prefektura Taizhou). Od zachodu chroniona jest przez masyw górski, a od wschodu otacza ją zatoka Sanmen. Granice stref planowania awaryjnego w Sanmen są dokładnie takie same jak dla elektrowni Haiyang, tj. 5 km dla wewnętrznej i 10 km dla zewnętrznej strefy narażenia na chmurę radioaktywną oraz 50 km dla strefy ograniczonego spożycia. Strefa ograniczonego planowania elektrowni Sanmen to również okrąg o promieniu 5 km, natomiast strefa wykluczenia ma nieregularny kształt, a odległość jej granicy od centrum reaktora waha się od 800 do 1500 metrów. Mimo że obie lokalizacje dzieli ponad 800 km w linii prostej, gęstość zaludnienia w ich bezpośrednim sąsiedztwie jest do siebie zbliżona. Tabela 1 przedstawia szczegółową liczbę ludności zamieszkującej poszczególne strefy wyznaczone na podstawie promienia odległości od danej elektrowni.

Zestawienie danych dla elektrowni Haiyang i Sanmen pozwala sformułować kluczowe wnioski dotyczące rzeczywistego wpływu gęstości zaludnienia na projektowanie stref planowania awaryjnego dla obiektów jądrowych. Analiza porównawcza, a zwłaszcza dane demograficzne z tabeli 1, wyraźnie pokazują, że to nie funkcja kogeneracyjna decyduje o wielkości stref planowania awaryjnego. Co więcej, elektrownia Sanmen, która nie dostarcza ciepła sieciowego, jest zlokalizowana na obszarze o większej gęstości zaludnienia, w promieniu 5 km i 10 km, niż kogeneracyjna elektrownia Haiyang.

Obie elektrownie, posiadające identyczne strefy planowania awaryjnego, spełniają te same, rygorystyczne chińskie wymogi lokalizacyjne, które ograniczają gęstość zaludnienia w najbliższym otoczeniu siłowni jądrowej. Obiekt w Haiyang ulokowano w bezpiecznej odległości od dużych aglomeracji, takich jak Yantai i Qingdao, na

Tabela 1. Liczba ludności zamieszkująca poszczególne strefy wyznaczone na podstawie promienia odległości od elektrowni [12, 19].

Table 1. The number of people living in individual zones determined by the radius of distance from the power plant [12, 19].

Elektrownia	Odległość od elektrowni (km)			
	5	10	20	50
Haiyang (2020 r.)	6382	38450	206479	1071789
Sanmen (2014 r.)	12700	47899	248704	2229823

terenie o małej gęstości zaludnienia, co było warunkiem koniecznym do uzyskania licencji.

Wniosek z chińskiego studium przypadku jest zatem następujący: kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i akceptowalności projektu jądrowo-ciepłowniczego ma wybór lokalizacji o odpowiednio małej gęstości zaludnienia, który umożliwia wyznaczenie stref planowania awaryjnego zgodnych z krajowymi regulacjami. Sama funkcja kogeneracyjna, jeśli jest realizowana, tak jak w Haiyang, poprzez bezpieczny, wielostopniowy system wymiany ciepła z obiegu wtórnego, nie stanowi czynnika, który wymuszałby zmianę podejścia do planowania awaryjnego. Jest to argument pomocniczy, potwierdzający, że przy zachowaniu podstawowych zasad bezpieczeństwa jądrowego ciepłownicza rola elektrowni nie generuje dodatkowego ryzyka radiologicznego dla otoczenia.

4. Fińskie podejście do stref planowania awaryjnego i jądrowej generacji ciepła

4.1. Zasady wyznaczania stref planowania awaryjnego w Finlandii

W Finlandii kwestie planowania awaryjnego dla elektrowni jądrowych są uregulowane w kilku aktach prawnych i przepisach niższego rzędu. Do najważniejszych z nich można zaliczyć Ustawę o energii jądrowej [20] oraz Dekret w sprawie energii jądrowej [21]. Określają one ogólne obowiązki w zakresie bezpieczeństwa oraz precyzują wymogi dotyczące planów awaryjnych.

Fińskie przepisy definiują dwie główne strefy planowania na wypadek awarii radiologicznej wokół elektrowni jądrowej: **wewnętrzną strefę działań zapobiegawczych** oraz **zewnętrzną strefę planowania awaryjnego**. W celu zachowania spójności terminologicznej i uniknięcia niejednoznaczności w dalszej części artykułu druga strefa będzie określana jako **strefa zewnętrzna**.

Obowiązująca od 2024 roku regulacja fińskiego Urzędu ds. Promieniowania i Bezpieczeństwa Jądrowego (fiń. *Säteilyturvakeskus*, STUK) [22] wskazuje, że wewnętrzną strefę działań zapobiegawczych należy wyznaczać tak, aby w razie awarii niemal na pewno nie trzeba było ewakuować mieszkańców spoza jej granic, a wszystkie konieczne działania ewakuacyjne dało się przeprowadzić wewnątrz niej, chroniąc ludność przed poważnymi skutkami deterministycznymi promieniowania jonizującego lub ograniczając ich skalę. Z tego względu w obrębie tej strefy obowiązują ograniczenia dotyczące zagospodarowania terenu. Jej promień ustala się dopiero po wykazaniu, że przy najgorszym scenariuszu dawka, jaką mogłaby otrzymać nieosłonięta osoba znajdująca się tuż poza strefą, nie przekroczy **1 Sv w ciągu pierwszych 10 godzin** od początku narażenia na promieniowanie. Strefę zewnętrzną wyznacza się natomiast w taki sposób, aby w razie wypadku istniało wysokie prawdopodobieństwo, że nie będzie

potrzeby, aby ludność schroniła się w pomieszczeniach poza jej granicami. Podczas ustalania zasięgu tej strefy należy wykazać, że w najbardziej niekorzystnym scenariuszu dawka, jaką mogłaby otrzymać nieosłonięta osoba tuż poza strefą, nie przekroczy **10 mSv w ciągu 48 godzin** od początku narażenia na promieniowanie. Zgodnie z przepisami obszar ten nie powinien przekraczać około **20 km** od elektrowni jądrowej.

Dla kontekstu historycznego warto dodać, że do niedawna fińskie przepisy określały orientacyjne promienie tych stref: około **5 km dla strefy działań zapobiegawczych** oraz około **20 km dla strefy zewnętrznej** wokół wszystkich elektrowni jądrowych. Najnowsza regulacja z 2024 roku usunęła jednak sztywne wartości 5 i 20 km z definicji stref, zastępując je kryteriami związanymi z dawką promieniowania. Obecnie rozmiar stref wyznacza się na podstawie analiz przebiegu potencjalnych awarii i ich skutków radiologicznych. W praktyce oznacza to, że dla dużych konwencjonalnych elektrowni jądrowych strefy te prawdopodobnie pozostaną zbliżone do dotychczasowych, jednak dla mniejszych reaktorów czy nowych projektów mogą zostać zaproponowane mniejsze promienie, jeśli analizy bezpieczeństwa wykażą dotrzymanie powyższych kryteriów.

4.2. Plany ciepłowniczej elektrowni jądrowej w Helsinkach

Helsinki przygotowują się do budowy pierwszej w Finlandii małej elektrowni jądrowej wytwarzającej ciepło sieciowe. Inwestycja opiera się na technologii małych modułowych reaktorów jądrowych (ang. *Small Modular Reactor*, SMR). Projekt ten ma pomóc w realizacji celów dekarbonizacji ciepłownictwa, zastępując wyłączone elektrociepłownie węglowe bezemisyjnym źródłem ciepła, a także przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego miasta. Planowana elektrownia ma wykorzystywać SMR zaprojektowany specjalnie do produkcji ciepła dla sieci miejskiej. Fińska firma **Steady Energy** opracowała koncepcję reaktora **LDR-50**, niewielkiego ciśnieniowego reaktora wodnego o mocy cieplnej 50 MW [23]. Reaktor ten pracuje w stosunkowo łagodnych warunkach: temperatura około 150°C i ciśnienie poniżej 10 barów. Dzięki temu możliwe było uproszczenie konstrukcji i spełnienie rygorystycznych norm bezpieczeństwa przy mniejszej skali przedsięwzięcia. Kluczowym inicjatorem projektu jest miejska spółka energetyczna **Helen**, która dostarcza ciepło sieciowe i energię elektryczną na terenie Helsinek. Helen postawiła sobie ambitny cel osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2030 roku i eliminacji spalania paliw kopalnych do 2040 roku [24]. W związku z tym spółka aktywnie poszukuje czystych technologii zastępujących węgiel, gaz czy biomasę. We wrześniu 2024 roku Helen oficjalnie uruchomiła program energetyki jądrowej, którego celem jest przygotowanie gruntu pod budowę małego reaktora

do zasilania miejskiej sieci ciepłowniczej [25]. Za część technologiczną odpowiada **Steady Energy**, startup założony latem 2023 roku w celu komercjalizacji fińskiego konceptu jądrowej ciepłowni. W październiku 2023 roku Helen jako pierwszy operator ciepłowniczy podpisała list intencyjny ze Steady Energy, zakładający wspólne działania na rzecz budowy w Helsinkach małej elektrowni jądrowej do produkcji ciepła. Porozumienie (ważne do 2027 roku) obejmuje m.in. współpracę w procesie legislacyjnym (reforma prawa jądrowego), uzyskanie zgody lokalizacyjnej i wstępnej certyfikacji technologii oraz ustalenie ram cenowych dla przyszłej inwestycji [24]. Dzięki temu, że STUK zniósł wymóg stref bezpieczeństwa opartych wyłącznie na dystansie od reaktora, otworzyła się droga na lokalizację małych reaktorów w pobliżu gęstej zabudowy.

Projekt znajduje się obecnie w fazie planowania i demonstracji technologii. Faza pierwsza programu jądrowego Helen, rozpoczęta jesienią 2024 roku, potrwa do roku 2026 i obejmuje negocjacje z potencjalnymi partnerami, wybór dostawcy reaktora oraz analizę możliwych lokalizacji [24]. W maju 2025 roku ogłoszono przełomową wiadomość: Steady Energy we współpracy z firmą Helen uruchomi pilotażową instalację SMR w Helsinkach w celu przetestowania wszystkich kluczowych rozwiązań przed rozpoczęciem docelowej budowy. Będzie to pełnowymiarowy model reaktora LDR-50 zainstalowany w istniejącym budynku dawnej elektrociepłowni, jednak **bez użycia paliwa jądrowego**. Ciepło będzie wytwarzane za pomocą grzałek elektrycznych, które będą symulować pracę rdzenia reaktora. Taki obiekt demonstracyjny pozwoli sprawdzić w praktyce działanie systemów oraz przećwiczyć proces montażu i integracji z miejską siecią ciepłowniczą [26, 27]. Steady Energy zakłada, że budowa pierwszego właściwego reaktora LDR-50 rozpocznie się do 2028 roku, tak aby oddanie do eksploatacji nastąpiło około 2030 roku.

Projekt znajduje się dopiero w początkowej fazie, dlatego ostateczne miejsce instalacji małego modułowego reaktora dla sieci ciepłowniczej Helsinek nie zostało jeszcze wyznaczone. W związku z tym niemożliwe jest dzisiaj precyzyjne określenie, jak będą wyglądać granice stref planowania awaryjnego dla tego obiektu. Mimo to przypadek fiński został uwzględniony w analizie, ponieważ jest to nowatorskie, aktywnie rozwijane przedsięwzięcie, które może się stać ważnym wzorcem. Warto śledzić, jakie w praktyce będzie podejście fińskiego dozoru jądrowego do wyznaczenia tych stref dla reaktora zlokalizowanego w pobliżu dużej aglomeracji, zwłaszcza w kontekście niedawnej nowelizacji przepisów, która odeszła od sztywnych promieni na rzecz kryteriów opartych na dawkach.

5. Szwajcaria – 40 lat doświadczenia w jądrowej kogeneracji i planowaniu awaryjnym

5.1. Wyznaczanie stref planowania awaryjnego wokół szwajcarskich elektrowni jądrowych

Wyznaczenie stref planowania awaryjnego opiera się na szwajcarskim prawie jądrowym i przepisach o ochronie ludności. Głównym aktem jest Ustawa o Energii Jądrowej [28], a szczegółowe wymagania zawiera Rozporządzenie w Sprawie Ochrony w Sprawach Awaryjnych w Poblżu Instalacji Jądrowych [29].

Zgodnie z rozporządzeniem [29] wokół każdej elektrowni ustanawia się dwie strefy planowania awaryjnego: wewnętrzną i zewnętrzną. Strefa wewnętrzna obejmuje obszar, na którym może powstać zagrożenie dla ludności w przypadku poważnego incydentu i gdzie natychmiast wymagane są środki ochronne. Jej promień zależy od instalacji i zazwyczaj wynosi **od 3 do 5 km**. Strefa zewnętrzna przylega do strefy wewnętrznej i obejmuje obszar, na którym w przypadku poważnego zdarzenia może powstać zagrożenie dla ludności wymagające środków ochronnych, a jej promień wynosi około **20 km**. Strefa zewnętrzna jest podzielona na sześć nakładających się na siebie sektorów o kącie nachylenia 120° każdy. Granice sektorów pokrywają się z granicami gmin, co ułatwia koordynację z władzami lokalnymi. Podział na sektory umożliwia prowadzenie działań, takich jak ewakuacja czy ostrzeganie mieszkańców, wyłącznie w tych obszarach, które znajdują się na drodze rozprzestrzeniania się chmury radioaktywnej [30]. Granice stref ustala się na podstawie symulacji awarii. Przyjmuje się bardzo konserwatywne scenariusze uwalniania radionuklidów (np. pełne stopienie rdzenia reaktora), analizowane dla niekorzystnych warunków meteorologicznych. Historycznie przyjęto, że strefa wewnętrzna obejmuje teren, na którym przebywająca w radioaktywnej chmurze osoba bez ochrony mogłaby otrzymać dawkę **większą niż 1 Sv** w czasie przemierzania się chmury nad tym terenem. Strefa zewnętrzna obejmuje obszar, gdzie dawka bezpośrednia nie jest już zagrażająca życiu, ale opad radioaktywny może spowodować dodatkowe skażenie (np. żywności) [31].

5.2. Kogeneracyjna elektrownia Beznau

Elektrownia jądrowa Beznau jest najstarszą działającą elektrownią jądrową w Szwajcarii i jedną z najstarszych na świecie. Znajduje się na sztucznej wyspie na rzece Aare w gminie Döttingen w kantonie Aargau. Elektrownię tworzą dwa identyczne bloki oparte na reaktorach wodno-ciśnieniowych wyprodukowanych przez Westinghouse. Każdy blok ma moc elektryczną netto 365 MWe. Blok Beznau 1 podłączono do sieci pod koniec 1969 roku, a blok 2 w roku 1971 [32]. Od zimy 1983/1984 elektrownia jądrowa Beznau przekazuje część swojego ciepła odpadowego

do regionalnej sieci ciepłowniczej **REFUNA**. Przegrzana para o temperaturze około 127°C, odprowadzana z pośrednich stopni turbin, trafia do wymiennika ciepła, w którym podgrzewa wodę sieciową do około 120°C. Magistrala REFUNA liczy łącznie około 134 km, a z dostarczanego ciepła korzystają budynki w jedenastu gminach doliny Aare. Rocznie system zapewnia średnio około 170 GWh energii cieplnej [33].

5.2.1. Strefy planowania awaryjnego Beznau–Leibstadt

Elektrownia Beznau znajduje się w rejonie o wysokiej koncentracji obiektów jądrowych, dlatego jej strefy planowania awaryjnego tworzą w praktyce wspólny system z sąsiednimi instalacjami. Dla Beznau i położonej około 6 km na północny zachód elektrowni jądrowej Leibstadt wyznaczono **jedną wspólną strefę wewnętrzną** oraz **jedną strefę zewnętrzną**. Ich granice nie mają formy idealnych okręgów o promieniach 5 i 20 kilometrów, ponieważ rozporządzenie [29] nakazuje, aby przebiegały one możliwie dokładnie wzdłuż granic administracyjnych gmin. W efekcie strefy te przyjmują kształt nieregularnych wieloboków. Wewnętrzna strefa obejmuje również instytut badawczy Paul Scherrer Institute oraz magazyn odpadów promieniotwórczych ZWILAG. Dzięki wspólnemu przebiegowi granic możliwe było jednak zastosowanie jednolitych zasad ochrony dla całego obszaru.

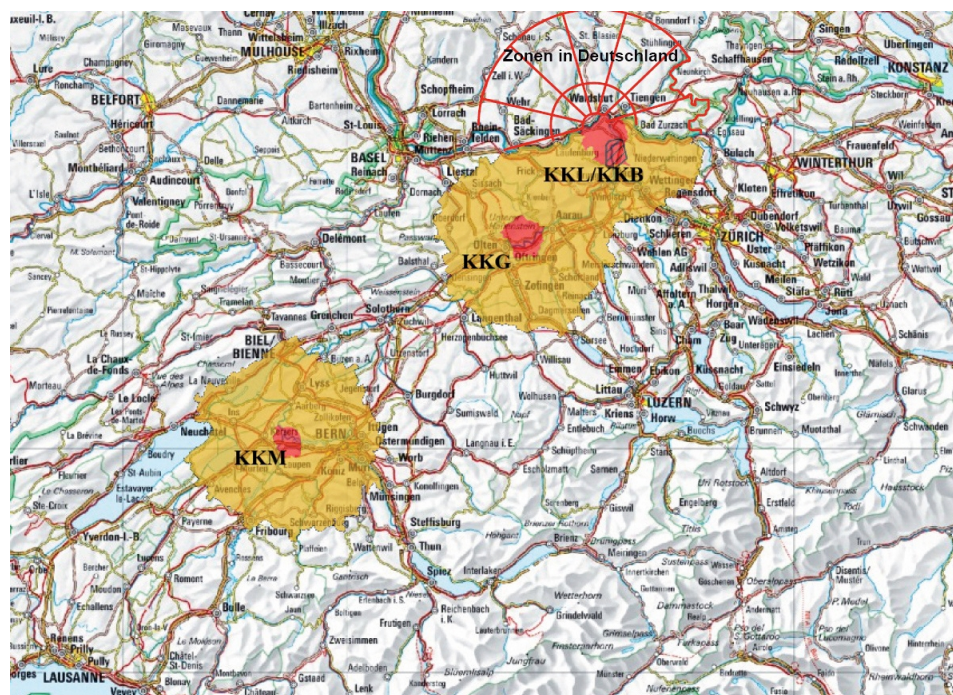
Strefa zewnętrzna wyznaczona dla elektrowni Beznau i Leibstadt nachodzi od zachodu na strefę zewnętrzną elektrowni jądrowej Gösgen, a gminy położone w rejonie nakładania się stref zostały ujęte w obu planach awaryj-

nych. Zasięg tej strefy przekracza również Ren, obejmując kilka miejscowości kraju związkowego Badenii-Wirtembergii, m.in. Waldshut-Tiengen, Laufenburg i Dogern. Szwajcarzy i Niemcy od lat ćwiczą wspólne reagowanie na ewentualną awarię bloków Beznau i Leibstadt. Działania po obu stronach granicy opierają się na tych samych zasadach; organy Badenii-Wirtembergii i szwajcarskie służby pozostają w stałym kontakcie i ściśle ze sobą współpracują. Formalne granice stref każdy kraj określa jednak według własnych przepisów: po niemieckiej stronie Renu opracowano odrębną koncepcję stref planowania awaryjnego, nieco różniącą się kształtem i zasięgiem od przyjętej w Szwajcarii [30, 34, 35]. Przebieg wszystkich stref planowania awaryjnego w Szwajcarii przedstawiono na rysunku 2.

Warto podkreślić, że system kogeneracyjny REFUNA nie wpłynął na wyznaczanie stref awaryjnych. Rurociąg ciepłowniczy odbiera ciepło z niskociśnieniowego, nieaktywnego obiegu wtórnego elektrowni, dlatego nie zmienia potencjalnych scenariuszy emisji promieniotwórczych.

5.3. Procedura ewakuacji na przykładzie Szwajcarii

Ochrona w sytuacjach awaryjnych ma na celu zabezpieczenie ludności narażonej na zwiększone natężenie promieniowania jonizującego, zapewnienie jej wsparcia w fazie przejściowej, dostarczenie niezbędnych środków oraz możliwie szybkie przywrócenie warunków normalnego funkcjonowania. W razie potrzeby należy wdrożyć



Rys. 2. Strefy planowania awaryjnego wokół elektrowni jądrowych w Szwajcarii. Strefa 1 – kolor czerwony, Strefa 2 – kolor pomarańczowy. Oznaczenia elektrowni: KKM – Mühleberg, KKG – Gösgen, KKL/KKB – Leibstadt/Beznau (źródło: <https://ensi.admin.ch/de/notfallschutz/notfallschu>).

Fig. 2. Emergency planning zones around nuclear power plants in Switzerland. Zone 1 – red color, Zone 2 – orange color. Power plant designations: KKM – Mühleberg, KKG – Gösgen, KKL/KKB – Leibstadt/Beznau (source: <https://ensi.admin.ch/de/notfallschutz/notfallschu>).

odpowiednie środki ochronne, uwzględniając uwarunkowania ekonomiczne i społeczne. Najpoważniejszym wyzwaniem jest jednak sprawna ewakuacja ludności z gęsto zaludnionych obszarów.

Skoordynowana i jednolita komunikacja jest jednym z kluczowych czynników sukcesu w przypadku ewakuacji na dużą skalę: przekaz musi być prosty, przejrzysty, punktualny, zrozumiały i wiarygodny. Umożliwia to większości mieszkańców podjęcie samodzielnych działań zmierzających do zapewnienia sobie bezpieczeństwa. Przekazywane komunikaty muszą obejmować przede wszystkim zalecenia dotyczące odpowiedniego zachowania i niezbędnego wyposażenia, numery alarmowe, wyznaczone trasy ewakuacyjne oraz lokalizacje punktów przyjęć. Na centralnych platformach informacyjnych krajowych i kantonalnych dane są konsolidowane i przekazywane społeczeństwu za pośrednictwem radia, telewizji, wiadomości SMS, rządowych stron internetowych oraz mediów społecznościowych. W sytuacji ewakuacji na pierwszy plan wysuwają się działania związane z kierowaniem ruchem, utrzymywaniem porządku publicznego, zapewnieniem bezpieczeństwa oraz ochroną wybranych grup ludności.

Założenia planu ewakuacyjnego koncentrują się wokół trzech kluczowych kwestii: liczby osób przebywających w danym obszarze, czasu potrzebnego na jego opuszczenie oraz prognozowanych reakcji społecznych. Populację objętą ewakuacją dzieli się orientacyjnie na trzy grupy: stałych mieszkańców (około 80%), osoby czasowo przebywające w strefach ochronnych podczas sytuacji kryzysowych (około 15%) oraz turystów (około 5%). W regionie Beznau/Leibstadt żyje około 23700 i 255 800 osób odpowiednio w strefie pierwszej i drugiej (dane na 2015 rok) [36].

Po ogłoszeniu ewakuacji około dwie trzecie mieszkańców opuszcza zagrożony obszar samodzielnie, najczęściej korzystając z prywatnych samochodów. Wspólne przejazdy organizowane są głównie wśród osób, które się znają. Zwykle członkowie rodziny spotykają się najpierw w swoim domu położonym w strefie ewakuacyjnej, a następnie wyjeżdżają razem. Każdy musi samodzielnie wybrać trasę, zdecydować, czy skorzysta z transportu prywatnego, czy publicznego i znaleźć schronienie poza obszarem ewakuacji. Około jedna trzecia mieszkańców to osoby zależne, niezdolne do opuszczenia strefy ewakuacyjnej własnym samochodem. W ich przypadku można wyróżnić trzy sytuacje: część osób potrzebuje transportu publicznego, ale potrafi samodzielnie dotrzeć do przystanku; inni, przebywający we własnych domach, wymagają pomocy opiekunów lub służb już przy wyjściu z mieszkania; pozostali mieszkają w placówkach zamkniętych, takich jak szpitale, domy opieki czy zakłady karne muszą być ewakuowani w asyście personelu, często z wykorzystaniem specjalistycznych pojazdów. Mimo wydania decyzji o ewakuacji w zagrożonym obszarze zawsze pozostaje pewien odsetek ludności. Zazwyczaj należą do nich osoby

świadomie ignorujące wezwania do opuszczenia strefy, podopieczni wymagający stałej opieki domowej, których nie udało się ewakuować prewencyjnie z powodu braku czasu lub dostępnych miejsc, a także personel odpowiedzialny za utrzymanie krytycznej infrastruktury oraz służby ratunkowe prowadzące działania ochronne.

Ewakuacja wszystkich osób chcących opuścić strefę wewnętrzną zajmuje przeciętnie około sześciu godzin od chwili wydania nakazu. Strefa zewnętrzna nie jest ewakuowana w całości, lecz sektorami, zależnie od kierunku wiatru. Przyjmuje się, że w ciągu dwunastu godzin można wyprowadzić z niej zdecydowaną większość chętnych. Znacznie dłużej, bo ponad 30 godzin, trwa ewakuacja placówek wymagających specjalnej organizacji, takich jak szpitale, zakłady karne czy ogrody zoologiczne. Rozmiar obszaru odgrywa tu rolę drugorzędną; głównym ograniczeniem nie jest przepustowość transportu, lecz sposób, w jaki zachowują się sami ewakuowani [36].

Po awarii w elektrowni jądrowej wyróżnia się zasadniczo dwa typy ewakuacji. **Ewakuacja prewencyjna** nakazuje opuszczenie terenu jeszcze przed przewidywanym uwolnieniem substancji promieniotwórczych; obejmuje strefę wewnętrzną, a w razie potrzeby także całość lub część strefy zewnętrznej, jeśli w porównaniu z innymi środkami ochrony zapewnia najlepszą ochronę przed promieniowaniem jonizującym. O decyzji przesądzają przede wszystkim: przebieg zdarzeń w elektrowni, prognozowane dawki, czas dostępny na działania oraz warunki pogodowe. **Późniejsza ewakuacja** ma miejsce już po uwolnieniu materiałów radioaktywnych i dotyczy obszarów, gdzie ludność byłaby narażona na podwyższone dawki promieniowania przez dłuższy czas, od kilku dni aż do kilku lat. W przypadku obszarów o niskim poziomie skażenia bezpieczniejszym rozwiązaniem może być pozostanie na miejscu, jeśli wdrożone zostaną odpowiednie środki ochronne.

W ciągu pierwszych godzin po zdarzeniu w elektrowni jądrowej kluczową rolę odgrywa Krajowe Centrum Alarmowe (niem. *Nationale Alarmzentrale*, NAZ), które koordynuje cały przepływ informacji. O samym nakazie ewakuacji społeczeństwo informuje bezpośrednio prezydent Szwajcarii lub inny członek Rady Federalnej, korzystając z radia i telewizji. Jeśli ogłasza się ewakuację prewencyjną, transport publiczny na obszarze objętym akcją zostaje wstrzymany nie później niż godzinę przed przewidywanym uwolnieniem materiałów promieniotwórczych.

Organizacja Zarządzająca Kantonem (niem. *Kantonale Führungsorganisation*, KFO) kieruje ruchem tak, aby ewakuacja przebiegała możliwie najsprawniej. Zapobiega korkom i wypadkom, zwiększa przepustowość dróg i linii kolejowych, korzysta ze zintegrowanych systemów sterowania, takich jak sygnalizacja świetlna, tablice informacyjne i oznakowanie, a także wspiera się środkami zabezpieczającymi i bieżącym nadzorem policji, straży pożarnej,

obrony cywilnej oraz wojska. Całość jest koordynowana z użyciem sieci radiowych i innych kanałów łączności. Podczas szeroko zakrojonej ewakuacji siły kantonalne odpowiadają za utrzymanie porządku i bezpieczeństwa. KFO prowadzi też rejestr osób, których nie udało się wywieźć z powodu ograniczeń czasu lub przepustowości; ustala ich potrzeby, zapewnia doraźną opiekę i organizuje późniejsze przemieszczenie w bezpieczne miejsce. W razie ogłoszenia ewakuacji wykorzystuje się całą dostępną infrastrukturę transportową. Za wspólne działania KFO i operatorów komunikacji publicznej odpowiada osoba odpowiedzialna za transport w sztabie KFO, która wraz z kryzysowymi menedżerami kolei i przedsiębiorstw autobusowych koordynuje niezbędne kroki. Gdy Rada Federalna zarządza ewakuację prewencyjną, federalni i kantonalni zarządcy dróg oraz przewoźnicy kolejowi, w porozumieniu z KFO, zwiększają liczbę kursów i przepustowość szlaków. Braki taboru w obszarze ewakuacji uzupełniają się pojazdami ściągniętymi spoza strefy, korzystając z zasobów prywatnych firm autobusowych oraz transportu wojskowego.

Obszar przyjęcia znajduje się około 10 km poza granicami zewnętrznej strefy; to właśnie tam trafiają i są zakwaterowywani ewakuowani. W razie awarii jądrowej kantony działające w tej strefie muszą w ciągu kilku godzin uruchomić sprawny system przyjęcia ludności. Doświadczenie pokazuje, że mniej więcej jedna trzecia ewakuowanych wymaga krótkotrwałego noclegu i zaopatrzenia; odsetek ten dość szybko spada do około 10%, ponieważ większość osób wkrótce organizuje sobie zakwaterowanie we własnym zakresie. Pozostali potrzebują schronienia przez dłuższy czas, od kilku tygodni do nawet kilku miesięcy. Za organizację całego systemu przyjęcia odpowiada KFO [36].

Podstawowy układ podmiotów, platform i kanałów komunikacyjnych pozostaje taki sam przy ewakuacji późniejszej, jak przy ewakuacji prewencyjnej. Trzeba jednak rozesłać kilka dodatkowych instrukcji: osoby bez własnego samochodu, które nie są w stanie samodzielnie dotrzeć do punktów zbiórki, powinny zgłosić się na infolinię; tam ich potrzeby zostaną zapisane, aby można było zaplanować transport. KFO wraz z władzami gmin mają obowiązek informować o lokalizacji miejsc zbiórki w obszarze przyjęcia. Podczas ewakuacji późniejszej ruch publiczny ogranicza się do wyznaczonych obszarów, aby zmniejszyć wtórne skażenie. Zależnie od poziomu promieniowania akcja rozpoczyna się z dwóch różnych punktów wyjścia. Przy umiarkowanych dawkach każda gmina wyznacza jedno lub kilka dobrze osłoniętych miejsc zbiórki, skąd ludność jest szybko wywożona. Jeżeli poziom promieniowania jest zbyt wysoki, ewakuacja odbywa się bezpośrednio z miejsc schronienia, takich jak mieszkania, biura, piwnice czy schrony i prowadzona jest stopniowo ulicami. Operatorzy infrastruktury krytycznej wymieniają personel we współpracy z KFO, a częstotliwość rotacji

zależy od natężenia promieniowania jonizującego. Osoby, które dobrowolnie pozostaną w strefie, muszą samodzielnie zapewnić sobie żywność i ochronę. Po wydaniu decyzji o ewakuacji późniejszej wstrzymany transport publiczny zostaje przywrócony w dostosowanym kształcie: przewoźnicy zwiększają przepustowość, wprowadzają dodatkowy tabor i zapasy paliwa, organizują zmiany kierowców, a luki w obsadzie wypełnia wojsko. Równocześnie uruchamia się Punkt Doradczy ds. Radioaktywności (niem. *Beratungsstelle Radioaktivität*), który przeprowadza ocenę dawek, segregację medyczną i udziela pomocy psychosomatycznej, odciążając system opieki zdrowotnej. Rząd federalny odpowiada za ochronę radiologiczną: kieruje ekspertów, sprzęt pomiarowy i personel medyczny do centrum, natomiast kantony zapewniają infrastrukturę, zespoły operacyjne i opiekę nad ewakuowanymi.

Po ustąpieniu zagrożenia zwiększonym poziomem promieniowania władze uchylają dotychczasowe środki ochronne, co pozwala mieszkańcom wrócić i ponownie osiedlić opuszczone tereny. Jeśli te obszary z powodu kontaminacji nie będą się nadawały do zamieszkania przez dłuższy czas (miesiące do lat), konieczne będzie zorganizowanie długoterminowego przesiedlenia dotkniętej ludności oraz ewentualnie rozpoczęcie dekontaminacji skażonych obszarów [36].

Studium przypadku Szwajcarii wyróżnia się na tle pozostałych, oferując ponad czterdzieści lat praktycznych doświadczeń zarówno w zakresie jądrowej kogeneracji, jak i planowania awaryjnego. Z jednej strony, długoletnia i bezproblemowa praca systemu ciepłowniczego REFUNA, zasilanego z elektrowni Beznau od 1983 roku, stanowi dowód na to, że kogeneracja nie wpływa na zasady wyznaczania stref planowania awaryjnego. Z drugiej strony, szwajcarski model pokazuje niezwykle pragmatyczne podejście do samego kształtu stref; dostosowanie ich granic do podziału administracyjnego gmin oraz podział strefy zewnętrznej na sektory znacząco ułatwia zarządzanie kryzysowe i pozwala na prowadzenie działań w sposób precyzyjny, a nie masowy.

Najcenniejszym elementem szwajcarskich doświadczeń jest jednak szczegółowo opracowany i przetestowany system ochrony ludności. Przedstawione w artykule procedury ewakuacji, obejmujące komunikację, logistykę, podział ról między instytucjami oraz szacowane czasy działania, tworzą gotowy wzorzec, który może posłużyć jako fundament do budowy polskich planów awaryjnych. To nie tylko teoria, ale sprawdzony w ćwiczeniach model, uwzględniający realne wyzwania, takie jak ewakuacja placówek medycznych czy zachowania społeczne. Szwajcaria dysponuje kompleksowym doświadczeniem i rozwiązaniami, które mogą znacząco skrócić i usprawnić proces przygotowań do wdrożenia energetyki jądrowej w Polsce, zwłaszcza w jej najbardziej wymagającym wymiarze społecznym.

6. Szansa dla Polski

Polski sektor ciepłowniczy zachowuje najwyższy udział paliw kopalnych wśród wszystkich gałęzi krajowej energetyki, a tempo jego dekarbonizacji pozostaje znacząco wolniejsze niż w elektroenergetyce [37,38]. Zgodnie z wymogami pakietu Fit-for-55 [39] oraz krajowego Programu polskiej energetyki jądrowej [40], systemy ciepła sieciowego muszą w ciągu najbliższej dekady przejść jakościową transformację: od źródeł opartych głównie na węglu i gazie w kierunku bezemisyjnych lub niskoemisyjnych technologii. Jedną z najbardziej perspektywicznych opcji jest wykorzystanie dużych reaktorów typu PWR oraz małych reaktorów modułowych do produkcji energii ciepłej dla sieci miejskich. W tym kontekście szczególnie obiecująca jest **lokalizacja Lubiatowo-Kopalino**, wskazana dla pierwszej krajowej elektrowni jądrowej. Już w latach 80. Biuro Studiów i Projektów Energetycznych Energoprojekt w Warszawie opracowało koncepcję wykorzystania ciepła odpadowego z planowanego wtedy bloku PWR do zasilania sieci Trójmiasta. Studium przewidywało przesył około **900 MWt** rurociągiem o długości około **40 km** do Gdyni, Sopotu i Gdańska, z możliwością włączenia po drodze lokalnych węzłów w Wejherowie lub Gdyni [41]. Wykonano wówczas wstępne obliczenia termohydrauliczne, analizę wariantów trasowania magistrali oraz ocenę strat ciepła, wskazując, że projekt może być konkurencyjny kosztowo względem klasycznych źródeł węglowych. Pomimo zawieszenia programu jądrowego w 1990 roku profil zapotrzebowania na ciepło w aglomeracji trójmiejskiej nadal pozwala na efektywne wykorzystanie pojedynczego bloku klasy AP1000. Aktualizacja historycznych danych mogłaby skrócić etap studialny pierwszego krajowego projektu kogeneracji jądrowej o kilka lat i radykalnie obniżyć ryzyko inwestycyjne.

Ponadto Ministerstwo Przemysłu ogłosiło 25 marca 2025 roku podczas Polskiego Kongresu Klimatycznego, że opracuje **mapę drogową SMR** i przedłoży ją Radzie Ministrów do końca 2025 roku. Dokument ten ma wyznaczyć jasne, technologicznie neutralne zasady dla inwestorów budujących SMRy w Polsce. Projekt powstaje równolegle z **białą księgą**, kompendium wiedzy o SMR, i ma skoordynować procedury administracyjne, modele finansowania, rozwój kadr, a także wspierać już rozpoczęte inicjatywy [42]. Dla kogeneracyjnych/grzewczych SMR-ów jest to szczególnie szansa, ponieważ ich niewielka moc cieplna i pasywne systemy bezpieczeństwa pozwalają lokować je znacznie bliżej odbiorców niż klasyczne duże bloki jądrowe. Takie podejście umożliwiłoby rozmieszczenie SMR-ów w pobliżu zabudowy miejskiej, a tym samym dekarbonizację dużych aglomeracji bez potrzeby budowy długich magistral przesyłowych.

7. Podsumowanie

Niniejszy artykuł pokazuje, że jądrowe ciepłownictwo może współistnieć z rygorystycznymi strefami planowania awaryjnego bez konieczności ich rozszerzania. Studium trzech państw stanowi punkt wyjścia. W Chinach dwublokowa elektrownia AP1000 Haiyang, która od 2019 roku ogrzewa miasto w ramach programu Warm Nuclear No. 1, zasila już 13 mln m² powierzchni, a mimo to zachowała klasyczny model stref; czynnik grzewczy pobierany jest z nieaktywnego obiegu wtórnego, więc nie zwiększa scenariuszy emisji. Finlandia poszła krok dalej: nowelizacja wytycznych STUK z 2024 roku usunęła sztywne promienie 5 km i 20 km, zastępując je kryterium dawki; dzięki temu pilotażowy SMR LDR-50 o mocy 50 MW, planowany przez spółkę Helen w Helsinkach, może zostać wzniesiony na terenie istniejącej ciepłowni miejskiej. Z kolei Szwajcaria od czterech dekad przesyła rocznie 170 GWh energii z elektrowni Beznau do jedenastu gmin systemem REFUNA; magistrala liczy 134 km i przecina nieregularne strefy awaryjne, których granice poprowadzono wzdłuż linii gminnych, co ułatwia organizację ewakuacji. Ten czterdziestoletni dorobek operacyjny obejmujący praktykę ochrony ludności i przeprowadzania ewakuacji może służyć Polsce jako gotowy wzorzec do adaptacji przy projektowaniu własnych planów dla polskich reaktorów jądrowych.

Doświadczenia te przekładają się bezpośrednio na polskie realia. Historyczne analizy dowodzą, że z planowanej lokalizacji Lubiatowo-Kopalino można rurociągiem długości około 40 km dostarczyć energię cieplną do regionu Trójmiasta; zaktualizowanie tych studiów skróciłoby fazę projektowania i pozwoliłoby wykorzystać pojedynczy blok AP1000 do zastąpienia większości węglowych źródeł ciepła w regionie. Co więcej, Ministerstwo Przemysłu przygotowuje mapę drogową SMR, co może się okazać pomocne w kwestii lokalizacji kogeneracyjnych SMR-ów w pobliżu dużych miast bez konieczności budowy odległych magistral.

Wspólny wniosek z analiz chińskich, fińskich i szwajcarskich jest zatem jednoznaczny: prawidłowo zaprojektowana kogeneracja jądrowa nie wymaga zmian podejścia w ustalaniu stref planowania awaryjnego, a w przypadku małych reaktorów można nawet ograniczyć strefę planowania awaryjnego do granic ogrodzenia zakładu, pod warunkiem że analiza bezpieczeństwa potwierdzi niskie dawki na jego terenie dla najcięższej rozpatrywanej awarii. Otwiera to drogę do lokalizowania kogeneracyjnych SMR-ów w pobliżu gęstej zabudowy miejskiej bez potrzeby budowy długich magistral przesyłowych. Przyjęcie tej logiki w Polsce pozwoli jednocześnie zrealizować cele Fit-for-55 w ciepłownictwie, ograniczyć emisję CO₂ oraz zbudować nowy segment przemysłu jądrowego.

Notka o autorze

Bartosz Skura – mgr inż. fizyki technicznej, absolwent Wydziału Fizyki PW. Doktorant na Wydziale Fizyki PW.
E-mail: bartosz.skura.dokt@pw.edu.pl

Literatura

- Kerekes L., Horváth G., Loskot-Strachota A., Oravcová, V., Sklenář O., Kotek P., & Takácsné Tóth B. (2023). *Decarbonisation of the Household Heating Sector in the Visegrad Countries* (V4ETTP Working Paper). REKK Foundation.
- Nuclear Safety Law of the People's Republic of China [Ustawa o bezpieczeństwie jądrowym Chińskiej Republiki Ludowej], Pub. L. No. 73 (01.09.2017).
- Regulations on Environmental Radiation Protection in Nuclear Power Plants [Regulacje ochrony radiologicznej środowiska elektrowni jądrowych] (GB 6249-2025). (24.01.2025). Ministerstwo Ekologii i Środowiska; Państwowa Administracja ds. Regulacji Rynku; Administracja Normalizacyjna Chin.
- Emergency planning and preparedness guidelines for nuclear power plants Part 1: Division of emergency planning areas [Kryteria planowania i gotowości awaryjnej elektrowni jądrowych – Część 1: Podział stref planowania awaryjnego] (GB/T 17680.1-2008). (02.07.2008). Państwowa Administracja Nadzoru Jakości, Inspekcji i Kwarantanny; Administracja Normalizacyjna Chin.
- China's Nuclear Emergency [Krajowy plan reagowania na awarie jądrowe]. (27.01.2016). Biuro Informacji Rady Państwa Chińskiej Republiki Ludowej.
- Nandutu M., Mahal J., Genco F., Tokuhiko A. & Zeliang C. (2024). Initial review of methods used to determine the size of the Emergency Planning Zone. *atw – International Journal for Nuclear Power*, 69(2), 44–59.
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej. (2015). *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency* (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7).
- Basic standards for ionizing radiation protection and radiation source safety [Podstawowe normy ochrony przed promieniowaniem jonizującym i bezpieczeństwa źródeł promieniowania] (GB 18871-2002). (02.12.2002). Państwowa Administracja Nadzoru Jakości, Inspekcji i Kwarantanny; Administracja Normalizacyjna Chin.
- Cao Q., Qiu L. (2023). Research on Atmospheric Dispersion Factor Used in the Calculation of Emergency Planning Zone. *Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference, Volume 1*, 257–269.
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej. (2018). *SMR Regulators' Forum Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors*.
- Haiyang NPP_National Nuclear Safety Administration. https://nnsa.mee.gov.cn/english/npps/list/201805/t20180517_440500.html [dostęp: 17.07.2025]
- Shandong Nuclear Power Co., Ltd. (17.10.2023). Shandong Haiyang Nuclear Power Project Units 5 and 6 Environmental Impact Report [Raport oddziaływania na środowisko dla bloków 5 i 6 elektrowni jądrowej Haiyang].
- Chen J., Zheng, W., Kong Y., Yang X., Liu Z., Xia, J. (2021). Case study on combined heat and water system for nuclear district heating in Jiaodong Peninsula. *Energy*, 218, 119546.
- Chinese long-distance nuclear heating project begins operation—*World Nuclear News*. <https://world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-long-distance-nuclear-heating-project-begi> [dostęp: 17.07.2025]
- China's first commercial nuclear district heating scheme expands—*World Nuclear News*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/chinas-first-commercial-nuclear-district-heating-scheme-expands> [dostęp: 17.07.2025]
- The heating capacity of a single unit has tripled! State Power Investment Corporation's „Nuanhe No. 1” project has started its sixth heating season. https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyxx/202411/t20241125_1096605.html [dostęp: 17.07.2025]
- Electric Power Research Institute. (2022). *Current and Past Use of District Energy Using Nuclear Power: A Review of Nuclear District Energy Facilities* (Technical Brief — Nuclear Beyond Electricity, Report No. 3002023462).
- Lingkai Z., Zhong Z., Wang Q., Liang K., Gong Z., Guo J., Zheng W., Shang P. (2023). Analysis of Heating Transformation of Nuclear Power Units. *E3S Web of Conferences*, 416(01010).
- Sanmen Nuclear Power Company Ltd. (2022). Environmental Impact Report for Units 3 and 4 of the Sanmen Nuclear Power Project [Raport oddziaływania na środowisko dla bloków 3 i 4 elektrowni jądrowej Sanmen].
- Ydinenergialaki (990/1987) [Ustawa o energii jądrowej] (11.12.1987).
- Ydinenergia-asetus (161/1988) [Dekret w sprawie energii jądrowej] (12.02.1988).
- Säteilyturvakeskus [Urząd ds. Promieniowania i Bezpieczeństwa Jądrowego]. (01.02.2024). *Säteilyturvakeskuksen määräys ydinvoimalaitoksen valmiusjärjestelyistä* (STUK Y/2/2024) [Rozporządzenie Urzędu ds. Promieniowania i Bezpieczeństwa Jądrowego w sprawie usteleń awaryjnych dotyczących elektrowni jądrowej].
- Sokka L., Kirpp H., Leppänen J. (2024). Evaluation of Life Cycle CO₂ Emissions for the LDR-50 Nuclear District Heating Reactor. *Energies*, 17(13), 3250.
- Finnish energy firm Helen launches nuclear programme—*World Nuclear News*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/finnish-energy-firm-helen-launches-nuclear-programme> [dostęp: 17.07.2025]
- Steady Energy | Steady Energy to build small nuclear pilot plant inside a former coal plant in central Helsinki. <https://www.steadyenergy.com/news-article/steady-energy-to-build-small-nuclear-pilot-plant-inside-a-former> [dostęp: 17.07.2025]
- modular reactors pave the way | VTT News. <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/small-modular-reactors-pave-way-nuclear-district-heating-finnish> [dostęp: 17.07.2025]
- Helen rents out the decommissioned Salmisaari B coal-fired power plant for the construction of a SMR pilot plant | Helen. <https://www.helen.fi/en/news/2025/helen-vuokraa-kaytosta-poistuneen-salmisaari-b-kivihiilivoimalai> [dostęp: 17.07.2025]
- Bundesgesetz über die friedliche Nutzung der Kernenergie (Kernenergiegesetz, KEG), SR 732.1 [Ustawa o Energii Jądrowej] (21.03.2003).
- Verordnung über den Notfallschutz in der Umgebung von Kernanlagen (Notfallschutzverordnung [NFSV]), SR 732.33 [Rozporządzenie w Sprawie Ochrony w Sprawach Awaryjnych w Poblizu Instalacji Jądrowych] (14.11.2018).
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). (19.11.2020). *Minimales Geodatenmodell «Zonenpläne für die Notfallplanung» (GeoIV Identifikator 178): Umgebung Kernkraftwerke Beznau/Leibstadt, Gösgen, Mühleberg sowie spezielle Zone PSI/ZWILAG. (GeoIV 178 – V1.1).*
- Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen. (02.10.2006). *Referenzszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke (HSK-AN 6073).*
- Beznau nuclear power plant, Döttingen, Switzerland. <https://www.nsenergybusiness.com/projects/beznau-nuclear-power-plant/> [dostęp: 17.07.2025]
- Axpo Power AG. (2021). *Beznau nuclear power plant – reliable, environmentally compatible electricity production.*
- Pohl-Meuthen, U., Schäfer, S., Blatt, P., & Steyer, F. (2018). *Konzept zur grenzüberschreitenden großräumigen Evakuierungsplanung am Beispiel Deutschland – Schweiz.* Technische Hochschule Köln – Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr.
- Regierungspräsidium Freiburg – Referat 14 F, Feuerwehr und Katastrophenschutz. (2012). *Notfallschutz: Ein Ratgeber für die*

- Bevölkerung in der deutschen Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt.*
36. Bundesamt für Bevölkerungsschutz. (2016). *Nationales Planungs- und Massnahmenkonzept Grossräumige Evakuierung bei einem KKW-Unfall* (10014098018/01). Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport.
37. Czyżak P. (07.02.2024). *Zmiana kursu: Polska energetyka w 2023 r.* Ember.
38. Urząd Regulacji Energetyki. (27.01.2025). *Energetyka ciepła w liczbach – 2023*.ping 8.8.8.
39. Komisja Europejska. (14.07.2021). *“Fit for 55”: Delivering the EU’s 2030 Climate Target on the way to climate neutrality* (COM(2021) 550 final).
40. Program polskiej energetyki jądrowej (aktualizacja 2020) – uchwała nr 141 Rady Ministrów z 2 października 2020 r., M.P. 2020 poz. 946.
41. Minkiewicz T., Reński A. (2014). The Possibility to Use a Nuclear Power Plant as a Source of Electrical Energy and Heat. *Acta Energetica*, 20(3), 114–118.
42. *Do końca roku ma powstać mapa drogowa dla SMR-ów—MP | Biznes PAP.*
<https://biznes.pap.pl/wiadomosci/firmy/do-konca-roku-ma-powsta-c-mapa-drogowa-dla-smr-ow-mp> [dostęp: 17.07.2025]