

GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE ASPEKTY WYBORU LOKALIZACJI ELEKTROWNI JĄDROWYCH W POLSCE

ENGINEERING-GEOLOGICAL ASPECTS OF CHOOSING A LOCATION FOR NUCLEAR POWER PLANTS IN POLAND

PAWEŁ DOBAK¹, ANDRZEJ DRĄGOWSKI¹, ZBIGNIEW FRANKOWSKI²

Abstrakt. W ramach przygotowywanego w 2011 r. „Programu Polskiej Energetyki Jądrowej” opracowywane są m.in. zagadnienia wyboru lokalizacji elektrowni jądrowej. Prace badawcze oraz analizy bezpieczeństwa obiektu jądrowego w wybranej lokalizacji zostaną przeprowadzone zgodnie z Prawem atomowym i powiązаныmi rozporządzeniami oraz wytycznymi Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu (IAEA). Waloryzacja alternatywnych lokalizacji wymaga przeprowadzenia etapowych analiz obejmujących czynniki geologiczne, geofizyczne i hydrogeologiczne udokumentowane na odpowiednim poziomie szczegółowości. Prace te będą służyły wyborowi lokalizacji pierwszej elektrowni jądrowej w Polsce oraz będą mogły być wykorzystane do lokalizacji kolejnych elektrowni w kraju. Wyniki oceny terenu pod lokalizację obiektu jądrowego wraz z wynikami badań i pomiarów zostaną opracowane w formie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i raportu lokalizacyjnego.

Słowa kluczowe: lokalizacja elektrowni jądrowej, dokumentacja geologiczno-inżynierska.

Abstract. Within the 2011 “Project of Polish nuclear power industry” issues concerning the choice of a location for nuclear power plants are discussed. Research and safety analysis of a nuclear power station in a chosen location will be carried out in accordance with the atomic law and other directives set by International Atomic Energy Agency (IAEA). The valorization of alternative locations requires step-by-step, detailed analyses including geological, geophysical and hydrogeological factors. This research will be used for choosing the location of the first nuclear power plant in Poland and it can be applied for future projects. The results of land evaluation in terms of nuclear power plant’s location and the outcome of research and measurements will be described in a engineering-geological documentation and in a report about locations.

Key words: nuclear power plant location, engineering-geological documentation.

WSTĘP

Minęło już ponad 20 lat od podjęcia w grudniu 1990 r. decyzji o rezygnacji z budowy pierwszej polskiej elektrowni atomowej w Żarnowcu. W chwili obecnej narastającemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną towarzyszą coraz bardziej restrykcyjne uwarunkowania ekonomiczne i środo-

wiskowe w zakresie rozwijania energetyki opartej na tradycyjnych paliwach kopalnych. Wymusza to pilny powrót do koncepcji energetyki jądrowej w Polsce. W ubiegłym dwudziestolecu warunki realizacji inwestycji jądrowych zmieniły się w sposób znaczący. Wynika to zarówno z nowych

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Katedra Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; p.dobak@uw.edu.pl, kos.geol@uw.edu.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; zbigniew.frankowski@pgi.gov.pl

technologii wdrażanych w energetyce jądrowej, zebranych doświadczeń wielu krajów oraz współczesnych wymagań środowiskowych i metod projektowania.

Postęp ten odzwierciedlają kolejne opracowania Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu (IAEA) obejmujące m.in. wymagania dotyczące kryteriów wyboru lokalizacji obiektów jądrowych. W ślad za ustaleniami międzynarodowymi nowelizowane są akty prawa polskiego. W Ustawie z dnia 13 maja 2011 r. – O zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. Nr 132, poz. 766) został dodany m.in. art. 35b, ust. 4 zobowiązujący do wydania rozporządzenia, określającego „...szczegółowy zakres przeprowadzania oceny terenu przeznaczanego pod lokalizację obiektu jądrowego, przypadki wykluczające możliwość uznania terenu za spełniający wymogi (...), a także wymagania dotyczące raportu lokalizacyjnego dla obiektu jądrowego, mając na uwadze konieczność zapew-

nienia bezpieczeństwa jądrowego, ochrony radiologicznej i ochrony fizycznej podczas rozruchu, eksploatacji i likwidacji tego obiektu oraz możliwość przeprowadzenia sprawnego postępowania awaryjnego w przypadku wystąpienia zdarzenia radiacyjnego, a także biorąc pod uwagę zalecenia Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej wydane w tym zakresie”.

Rozpatrując uwarunkowania lokalizacyjne i projektowe zakładów energetyki jądrowej oraz powiązanej z nimi bezpośrednio infrastruktury, należy podkreślić ich odrębność od obiektów przeznaczonych na składowanie odpadów promieniotwórczych lub wypalonego paliwa. Inne są bowiem wymagania zabezpieczenia obiektów jądrowych z reaktorami funkcjonującymi przez kilkadziesiąt lat i oddziaływującymi w sposób dynamiczny na otoczenie, a inne obiektów, w których odpady mają być składowane przez bardzo długi czas w możliwie najbardziej stabilnych warunkach.

PRAWNE UWARUNKOWANIA DOKUMENTOWANIA GEOLOGICZNEGO

Projektowanie obiektów jądrowych podlega m.in. przepisom prawa budowlanego, geologicznego i górniczego, wodnego oraz prawa o ochronie środowiska. W procesie projektowania obiektów zawarte jest wykonywanie badań geologiczno-inżynierskich oraz określanie warunków posadowienia obiektów. Rozwinięcie tych zagadnień znajduje się zarówno w rozporządzeniach wykonawczych do wymienionych wyżej ustaw, jak i w zespole przepisów normalizacyjnych Eurokod 7 wprowadzonych do stosowania od kwietnia 2010 r.

W świetle już wprowadzonych aktów prawnych: Ustawa z dnia 13 maja 2011 r. – O zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. Nr 132, poz. 766) i Ustawa z dnia 29 czerwca 2011 r. – O przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (Dz.U. Nr 135, poz. 789, z późniejszymi zmianami), dokumentowanie geologiczne związane z planowaniem i projektowaniem tych obiektów można zaliczyć do zadań o najwyższym priorytecie.

Dokumentowanie geologiczno-inżynierskie będzie prowadzone zgodnie z zasadami określonymi w rozporządzeniach Ministra Środowiska obejmującymi:

- ogólne zasady sporządzania projektów badań geologicznych (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie projektów prac geologicznych; Dz.U. Nr 153, poz. 1777);

- merytoryczne ramy sporządzanych dokumentacji (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 października 2005 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie; Dz.U. Nr 201, poz. 1673).

Niewątpliwie badania prowadzone dla obiektu jądrowego powinny uwzględniać ustalenia zawarte w tych przepisach, zwłaszcza że budowa tego typu zakładu wiąże się z powstawaniem szeregu obiektów towarzyszących, w tym

szczególnie z zakresu hydrotechniki oraz liniowych sieci infrastrukturalnych. Niemniej jednak istniejące uregulowania prawne nie są wystarczające dla pełnego uwzględnienia specyfiki obiektów jądrowych i potrzebne w tej dziedzinie będzie rozwijanie prac metodycznych w postaci instrukcji, a także wykonawczych aktów prawnych.

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 września 1998 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. Nr 126, poz. 839) sytuuje obiekty energetyki jądrowej w trzeciej kategorii geotechnicznej, gdzie wymagane jest wykonywanie zarówno dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, jak i dokumentacji geotechnicznej.

Powyższe obowiązujące przepisy wraz z przepisami specjalistycznymi, chociaż w wielu przypadkach ogólnymi, oraz wymaganiami zawartymi w Eurokodach 7 (PN-EN 1997-1:2008; PN-EN 1997-2:2009) są obecnie podstawowe w zakresie dokumentowania geologicznego i geotechnicznego.

Warto podkreślić, że w przypadku planowania i projektowania obiektów jądrowych stan prawny w Polsce jest obecnie dostosowywany, aby określić ścieżki postępowania. Zgodnie ze znowelizowaną Ustawą z dnia 13 maja 2011 r. – O zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. Nr 132, poz. 766) Ustawy z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. Nr 3, poz. 18, z późniejszymi zmianami) przed wyborem lokalizacji obiektu jądrowego inwestor przeprowadza badania obejmujące m.in. rozpoznanie warunków sejsmicznych, tektonicznych, geologiczno-inżynierskich, hydrogeologicznych, hydrologicznych i meteorologicznych. Warunki przyrodnicze z uwzględnieniem bezpieczeństwa, gęstości zaludnienia i innych są przedstawiane w postaci raportu lokalizacyjnego. Do wniosku o wydanie decyzji o lokalizacji inwestycji zgodnie z Ustawą z dnia 29 czerwca 2011 r. – O przygotowaniu i re-

alizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (Dz.U. Nr 135, poz. 789, z późniejszymi zmianami) dołącza się wspomniany raport

lokalizacyjny. Przedstawione poniżej propozycje stanowią materiał wyjściowy dla dalszych prac metodycznych przy badaniach podłoża dla obiektów tego typu.

ETAPY PROCESU LOKALIZACYJNEGO I DOKUMENTACYJNEGO

W opracowaniu Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA, 2004) rozwinięte zostały czynniki wyboru lokalizacji obiektów jądrowych, przy czym wyróżniono następujące etapy działań:

- I etap – selekcji, czyli wyboru lokalizacji;
- II etap – charakterystyki warunków lokalizacyjnych, obejmujący;

- a) weryfikację wskazanych opcji z uwzględnieniem uprzednio wyróżnionych wykluczających kryteriów,

- b) sformułowanie niezbędnych dla projektowania charakterystyk lokalizacji i podłoża obiektów;

- III etap – „przedoperacyjny”, obejmujący kontynuację studiów i badań podjętych w poprzednim etapie i realizowany już w okresie projektowania i budowy, a więc po podjęciu odpowiednich decyzji lokalizacyjnych;

- IV etap – operacyjny, związany z badaniami prowadzonymi w trakcie eksploatacji obiektu. Należy sądzić, że badania mają na celu monitorowanie warunków geologiczno-inżynierskich w podłożu oraz wczesne ostrzeżenie przed możliwymi zagrożeniami w zakresie m.in. utrzymania przyjętych w projekcie tzw. stanów użytkowania.

Dla wyboru lokalizacji obiektu jądrowego w etapach I oraz II źródłem danych powinny być:

- wyczerpująca analiza:

- a) dotychczasowych dokumentacji wykonywanych dla potrzeb lokalizacji obiektów energetyki jądrowej i wodnej,

- b) materiałów archiwalnych dotyczących rozpatrywanych terenów lokalizacyjnych w ujęciu: regionalnym (za-

gadnienia strukturalne i sejsmiczne) oraz lokalnym (procesy i warunki geologiczno-inżynierskie oraz geotechniczne),

- c) literatury zawierającej doświadczenia i wnioski z projektowania oraz budowy obiektów jądrowych za granicą, w tym tzw. „case story” oraz syntetyczne opracowania metodyczne;

- dokumentacje geologiczno-inżynierskie, hydrogeologiczne i geofizyczne sporządzane na etapie analiz dla wyboru alternatywnie wyróżnianych lokalizacji przedsięwzięć i obiektów.

Trzeba zaznaczyć, że na podstawie samego studiowania nawet najbogatszych materiałów archiwalnych nie można określić w sposób ilościowy wielu zidentyfikowanych jakościowo czynników, a to jest podstawą bezpiecznego i ekonomicznie uzasadnionego procesu decyzyjnego.

Praktyka dokumentowania (sporządzania projektów badań geologicznych oraz dokumentacji geologiczno-inżynierskich, hydrogeologicznych i geofizycznych) jest powszechnie stosowana nie tylko dla projektowania, ale także na etapie wyboru lokalizacji i alternatywnych rozwiązań ważniejszych przedsięwzięć inwestycyjnych, takich jak: elektrownie, obiekty hydrotechniczne, przebieg autostrad, linii kolejowych itd.

W tryb sporządzania raportów lokalizacyjnych należy więc obligatoryjnie wprowadzić przedstawione wyżej etapy oraz instrumenty postępowania, w tym wymaganie sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich dla etapu wyboru lokalizacji obiektów jądrowych.

OGÓLNE ZASADY DOKUMENTOWANIA GEOLOGICZNEGO

Rozwinięcie zasad dokumentowania geologicznego wymaga przyjęcia dla etapów wyboru rozwiązań oraz projektowania obiektów odpowiedniej strategii działań wstępnych, obejmujących analizę:

- warunków geologicznych uwzględniających zagadnienia geodynamiki (budowę strukturalną, aktywność neotektoniczną i sejsmiczną, model budowy podłoża) i określenie zasięgu przestrzennego jego analiz na różnych etapach planowania, projektowania i eksploatacji, a w końcu i perspektyw zamknięcia oraz likwidacji obiektów. Istniejące dane i doświadczenia pochodzą zarówno z:

- a) dotychczasowych prac dokumentacyjnych wykonanych w okresie blisko 40 lat w Polsce dla potrzeb planów rozwoju energetyki jądrowej;

- b) syntetycznych opracowań IAEA;

- ogólnych technicznych założeń projektowanych obiektów (przestrzenne usytuowanie i wymiary, różne sposoby fundamentowania, głębokość posadowień, orientacyj-

ne naciski, charakterystyka pracy obiektu: obciążenia stałe i zmienne, statyczne i dynamiczne, powiązania infrastrukturalne oraz techniczne warunki ich funkcjonowania).

W wymaganiach Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA, 2003) wyróżnione są dwa podstawowe czynniki bezpośrednio związane z problematyką geologiczno-inżynierską. Są to:

- trzęsienia ziemi i nieciągłości strukturalne;
- ryzyko związane z uwarunkowaniami geodynamicznymi i geotechnicznymi, a w tym:

- a) stateczność skarp i zboczy,

- b) procesy zapadowe, osiadania i pęcznienie podłoża,

- c) upłynnienie gruntów,

- d) zachowanie się podłoża fundamentowego.

Do pośrednich czynników, które powinny być uwzględniane w prognozach geologiczno-inżynierskich, należą oddziaływania związane ze zdarzeniami meteorologicznymi, zagrożeniami powodziowymi i podtopieniami, a także wy-

padkami zależnymi od funkcjonowania instalacji i systemów przemysłowych, infrastrukturalnych, komunikacji itd. Ze względu na ważność, zagadnienia te są uszczegółowiane np. IAEA (2011).

Rozpatrywane listy charakterystyk środowiska geologicznego oraz naturalnych i antropogenicznych zagrożeń mają na etapie wstępnych analiz lokalizacyjnych za zadanie identyfikację możliwych problemów. Ocena prawdopodobieństwa ich wystąpienia oraz ewentualnych skutków ich oddziaływania na obiekt jądrowy pozwala uporządkować ich prognozowane znaczenie i wprowadzić pewien ranking.

Warto zaznaczyć, że niektóre – na szczęście nieliczne – uwarunkowania bezdyskusyjnie eliminują daną lokalizację. Do takich terenów można zaliczyć np. fundamentowanie bezpośrednio na gruntach słabych, bliskie sąsiedztwo epicentrow wstrząsów sejsmicznych lub parasejsmicznych, zagrożenia powodziowe o prawdopodobieństwie większym niż czas funkcjonowania obiektu i jego bezpiecznej likwidacji (z odpowiednimi współczynnikami bezpieczeństwa). Pozostałe czynniki powinny być uszeregowane z uwzględnieniem szacowania kosztów zarówno zabezpieczeń, jak również eliminacji ewentualnych szkód.

Wśród geologicznych czynników lokalizacyjnych obiektów jądrowych z uwagi na ich rangę i skutki awarii kluczowe znaczenie nadaje się zagrożeniom związanym z dynamiką podłoża. Zagadnienia te powinny być rozpatrywane w następujących aspektach:

- usytuowanie analizowanej lokalizacji na tle regionalnych uwarunkowań strukturalnych (sztywne obszary platformowe, obszary fałdowań starszych oraz młodszych z tendencją do kontynuacji – ruchy alpejskie);

- ocena potencjalnej naturalnej aktywności sejsmicznej oparta na:

- a) regionalnych uwarunkowaniach strukturalnych,
- b) intensywności ruchów geotektonicznych,
- c) zapisach aktywności sejsmicznej w strukturze osadów,
- d) historycznych zapiskach kronikarskich,
- e) współczesnych zapisach sejsmograficznych w połączeniu z lokalizacją epicentrow i analizą rozchodzenia się i tłumienia energii fal sejsmicznych,
- f) przebiegu lineamentów wyznaczonych na zdjęciach satelitarnych lub numerycznych modelach terenu (Graniczny, 1989);

- antropogenicznie indukowane wstrząsy sejsmiczne powstające na skutek zmiany stanu naprężenia w górotworze w związku z działalnością górniczą oraz funkcjonowaniem dużych, sztucznych zbiorników wodnych.

Dotychczas zebrane doświadczenia wskazują w szczególności na potrzebę oceny:

- ryzyka indukowanych wstrząsów sejsmicznych w kontekście czynników strukturalnych i geotektonicznych;

- geomechanicznej charakterystyki podatności głębokiego podłoża na rozładowywanie zmian naprężeń spowodowanych procesami tektonicznymi oraz indukowanych antropopresją; dotyczy to przykładowo występowania w podłożu plastycznych kompleksów solnych;

- wpływu kompensacji sejsmicznej na zmiany tempa ruchów geotektonicznych.

Niepokój sejsmiczny jest zmiennym i trudnym do przewidywania zagrożeniem, które musi być oceniane z uwzględnieniem:

- analiz geotektonicznych i geofizycznych uwarunkowań potencjalnych współczesnych drgań i przemieszczeń w skorupie ziemskiej;

- prognoz sejsmiczności naturalnej;

- prognoz występowania sejsmiczności indukowanej antropopresją (roboty górnicze, wielkoprzestrzenne odwodnienia, eksploatacja zbiorników retencyjnych, zabiegi udrożniające górotwór w eksploatacji otworowej itd., a także rozłożone na wiele lat zabiegi rekultywacyjne związane z przemieszczeniem mas ziemnych i napełnianiem głębokich wyrobisk poeksploatacyjnych wodą).

Dla bezpiecznego funkcjonowania obiektów jądrowych należy rozpatrywać istotne możliwe skutki wszelkich zdarzeń sejsmicznych ze szczególnym uwzględnieniem strefy istotnych oddziaływań na obiekt jądrowy. W wyznaczeniu strefy analiz w otoczeniu rozpatrywanej lokalizacji należy m.in. brać pod uwagę:

- dotychczasowe doświadczenia zasięgu oddziaływania wstrząsów naturalnych oraz indukowanych działalnością górniczą;

- wielkości przyspieszenia drgań (przemieszczeń gruntu) istotne ze względu na odporność projektowanych obiektów na skutki obciążeń dynamicznych;

- aktualne prognozy zasięgu oddziaływań związanych z wprowadzaniem nowych technologii górniczych (np. pozyskiwania gazu łupkowego, zabiegów udrożniających konduktowność w wyczerpywanych złożach węglowodorów, podziemnego, bezzbiornikowego składowania odpadów itd.);

- zalecenia PN-EN 1998-1:2005 – Eurokod 8.

Pierwszy i drugi z tych czynników są możliwe do ilościowych oszacowań w chwili obecnej, trzeci natomiast ma charakter bardziej spekulatywny.

Warto przy okazji przypomnieć, że w okresie 30 lat redukcja ciśnienia gazu w złożach Groningen (Holandia) o ponad połowę (tj. ok. 35 MPa) spowodowała kilkadziesiąt zarejestrowanych zdarzeń sejsmicznych i osiadanie terenu dochodzące do 200 mm. Zasięg przestrzenny tych oddziaływań trudno byłoby arbitralnie zakreślić w promieniu rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Prognoza ich rozwoju w czasie zależna jest od lepkości sąsiadujących ze złożem mas solnych, a wyniki modelowania wskazują na okres od 100 do 10 000 lat.

WARUNKI GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

Geologiczno-inżynierskie uwarunkowania lokalizacji obiektów jądrowych należy rozpatrywać w trzech grupach zagadnień:

- regionalnej charakterystyki warunków geologiczno-inżynierskich;
- prognoz występowania procesów geodynamicznych;
- geologiczno-inżynierskiej i geotechnicznej oceny gruntów podłoża i otoczenia obiektów jądrowych.

Czynniki regionalne wiążą się z zależnością właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów od ich genezy i historii obciążeń geologicznych. Niewątpliwie taka charakterystyka jest dobrą podstawą szeregowania jakościowego lokalizacji.

Utwory najmłodsze, nieskonsolidowane, nie są właściwym podłożem dla bezpośredniego fundamentowania obiektów energetycznych. Na terenach nadmorskich oraz w dolinach rzecznych niezbędne jest wyróżnienie obszarów akumulacji aluwialnej morskiej lub jeziornej oraz erozyjnego cokołu wysoczyznowego, charakteryzujących się znacząco odmiennymi właściwościami ośrodka gruntowego. Osady akumulacji morskiej i jeziornej (w tym organiczne), których obecność na polskim wybrzeżu Bałtyku jest w wielu miejscach związana z działaniem prądu przybrzeżnego tworzącego mierzeje, oraz towarzyszące im osady zastoiskowe nie mogą być bezpośrednim podłożem obiektów jądrowych.

Utwory pochodzenia glacialnego, występujące bezpośrednio pod powierzchnią terenu w przypadku brzegów erozyjnych (klify) lub też wychodzące na powierzchnię w odległości od kilku do kilkunastu kilometrów od obecnej linii brzegowej, wymagają szczegółowego rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich. Dla oceny zespołu tych gruntów przede wszystkim należy określić ich wiek oraz stopień skonsolidowania stanowiący podstawowy czynnik wzmocnienia gruntów tych formacji. Rozpatruje się przy tym zarówno wiek depozycji osadów, jak i ich pozycję facyjną (np. gliny bazalne, morena denną, czołową, utwory facji wytopiskowej). Efekty przekonsolidowania ocenia się ilościowo na podstawie badań ściśliwości prowadzonych w przedziale naprężeń dostosowanym do projektowanych obciążeń budowlą.

Istotnym elementem komplikacji warunków gruntowych, stanowiącym podstawę zaliczenia projektowanych obiektów do III kategorii geotechnicznej, jest występowanie **zaburzeń glacitektonicznych**.

Neogeńskie grunty zastoiskowe miopłocieńskiego jeziorzyska Polski środkowej oraz mioceńskie utwory zapadliska przedkarpackiego mogą stwarzać zagrożenia wynikające z lokalnej ekspansywności (tendencji do pęcznienia lub skurczu w warunkach zmian wilgotności, wpływów klimatycznych i oddziaływania roślinności).

Specyficzne problemy mogą stwarzać **zwietrzliny** rozwinięte na starszym skalnym podłożu. W przypadku płytkiego położenia mogą się ujawniać właściwości ekspansywne. Ponadto zwietrzliny położone nawet na znacznej głębokości, rzędu 100 m poniżej poziomu posadowienia, mogą znajdować się w strefie aktywnej podłoża obiektu jądrowego z uwa-

gi na znaczne wymiary fundamentów, a także przyjęte standardy w zaleceniach IAEA (2004). Dla obiektów jądrowych przyjmuje się w takim przypadku zwiększenie przestrzeni prowadzenia analiz do głębokości, na której naprężenia od obiektu wynoszą 10% naprężeń pierwotnych (standardowo w Polsce przyjmowało się w budownictwie powszechnym 30%). Dla zwietrzelin należy opracować profil wietrzniowity i wydzielić w nim strefy charakteryzujące się odrębnymi właściwościami.

W ocenie możliwości rozwoju procesów geodynamicznych należy uwzględnić:

- warunki stateczności skarp i zboczy oraz ich zmiany na skutek statycznego obciążenia od obiektów i działania obciążeń dynamicznych: eksploatacyjnych oraz nadzwyczajnych (w tym wyżej analizowanych skutków zdarzeń sejsmicznych);

- specjalne podejście do fundamentowania na obszarach akumulacji lessów; ocenę ich **zapadowości** oraz tendencji do intensywnych procesów **erozji** powierzchniowej i wewnętrznej; generalnie trudno jest zalecać bezpośrednie posadowienie obiektów jądrowych na tego typu gruntach;

- zmiany dynamiki krążenia wód podziemnych przy specyficznym zróżnicowaniu granulometrycznym gruntów niespoistych, co prowadzi do powstawania filtracyjnych deformacji gruntów, w tym zjawisk sufozyjnych;

- występowanie skał węglanowych oraz gipsów, ocenę i charakterystykę ilościową rodzaju istniejących form krasowych, jak również możliwość rozwoju tego procesu w zmienionych warunkach obciążeń oraz warunkach dynamiki wód podziemnych w nawiązaniu do funkcjonowania obiektu jądrowego i towarzyszących mu obiektów hydrotechnicznych;

- rodzaj skał i ocenę ich spękania, podatność na krasowanie, pęcznienie i chemiczne oddziaływanie wód podziemnych oraz właściwości specyficzne, jak np. odkształcenia o charakterze reologicznym; ten ostatni przypadek należy również odnieść do gruntów nieskalistych;

- prognozy rozwoju erozji i akumulacji szczególnie w odniesieniu do akwenów znajdujących się w sąsiedztwie obiektu jądrowego i poddanych wpływom związanym z jego eksploatacją; procesy te powinny być analizowane w nawiązaniu do prawdopodobieństwa występowania ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz hydrologicznych w okresie budowy, eksploatacji oraz likwidacji obiektu jądrowego;

- ilościowe aspekty procesów eolicznych na wybrzeżach morskich: wywiewania, transportu i akumulacji materiału piaszczystego.

Ocena właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów podłoża i otoczenia obiektów jądrowych oraz warunków geotechnicznych powinna być dostosowana do obowiązujących rozwiązań Eurokodu 7 (PN-EN 1997-2:2009), gdzie wyróżnia się 5 stanów granicznych: EQU, STR, GEO, UPL i HYD. Na etapie wyboru warunków lokalizacyjnych należy w pierwszej kolejności uwzględnić przypadek GEO obejmujący zniszczenie albo nadmierne odkształcenie podłoża,

gdy wytrzymałość gruntu lub skały jest decydująca dla zapewnienia nośności (Wysokiński, 2009). Istotne mogą się okazać dotychczas mało akcentowane sprawdzenia stanów granicznych:

- UPL – utrata stateczności konstrukcji albo podłoża (utrata równowagi pionowej) spowodowana ciśnieniem wody (wyporem lub innymi oddziaływaniami pionowymi);

- HYD – wypiętrzenie hydrauliczne, erozja wewnętrzna lub przebicie hydrauliczne w podłożu spowodowane spadkiem hydraulicznym.

Te przypadki powinny być szczególnie rozpatrywane w wariantach możliwych stanów awaryjnych, związanych z zaburzeniami funkcjonowania towarzyszących obiektów hydrotechnicznych.

W odniesieniu do prognoz geologiczno-inżynierskich, geotechnicznych, sejsmicznych czy też hydrogeologicznych i hydrologicznych stosuje się zindywidualizowane współczynniki bezpieczeństwa, zależne od rodzaju zastosowanych metod analiz i stopnia rozpoznania ośrodka. W przypadku ważnych obiektów są one niemal zawsze znacząco większe niż standardowe. Z kolei w przypadku ekstrapolacji wyników obserwacji uwzględnia się miarodajność zależności statystycznych, na podstawie których konstruuje się prognozy. Stąd w proponowanych zaleceniach należy przyjmować dodatkowy zapas bezpieczeństwa po wcześniejszym uwzględnieniu wszystkich profesjonalnych współczynników bezpieczeństwa stosowanych w rozwiązaniach konkretnych zagadnień prognostycznych. Ocena wielkości tego zapasu bezpieczeństwa powinna być merytorycznie przeanalizowana i uzasadniona.

W prognozowaniu zachowania się obiektów w trakcie ich eksploatacji oraz stanów awaryjnych należy uwzględnić:

- ocenę przemienności, czyli następowania odwracalnych zmian właściwości mechanicznych i fizycznych gruntów w wyniku oddziaływania różnych czynników zewnętrznych, takich jak zmiany wilgotności;

- zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów pod wpływem temperatury, obejmujące zarówno przemarzanie, jak i znacznie istotniejsze zmiany spowodowane działaniem podwyższonych temperatur w obiekcie emitującym duże ilości ciepła (także w sytuacjach awaryjnych);

- kategoryzację terenów na podstawie prędkości propagacji fali w ośrodku gruntowym stanowiącym podłoże budowlane;

- prognozowanie rozwoju procesu upłynniania gruntów z określeniem potencjalnych właściwości tiksotropowych:

- a) kryteriów granulometrycznych,

- b) wrażliwości strukturalnej,

- c) uwarunkowań zewnętrznych upłynnienia analizowanych gruntów poddanych spodziewanym cyklicznym obciążeniom dynamicznym,

- d) wpływu drgań na zmianę właściwości mechanicznych gruntów.

Powyższe analizy powinny być wykonywane w nawiązaniu do charakterystyki obciążeń eksploatacyjnych oraz nadzwyczajnych, a w efekcie umożliwiać:

- wydzielenie stref podatnych na upłynnienie lub osłabienie podłoża,

- określenie wszystkich istotnych wpływów działalności górniczej i składowisk na teren rozpatrywanej lokalizacji obiektu jądrowego.

PROPOZYCJA ZAKRESU I METODYKI PRAC DOKUMENTACYJNYCH I ANALITYCZNYCH

Prace dokumentacyjne proponuje się prowadzić w kilku etapach różniących się szczegółowością rozpoznania.

W **etapie wstępnym** analizą jest najczęściej objętych kilka potencjalnych lokalizacji elektrowni jądrowej na 3 poziomach szczegółowości (IAEA, 2002):

- regionalnym – w promieniu 150 km od projektowanej lokalizacji elektrowni jądrowej obejmującym: charakterystykę geologiczną, tektoniczną i sejsmiczną na podstawie materiałów archiwalnych; efektem jest tu opracowanie zebranych materiałów i przygotowanie sprawozdania z badań;

- subregionalnym – w promieniu 25 km od projektowanej lokalizacji elektrowni jądrowej obejmującym uszczegółowione ilościowe dane geologiczne, tektoniczne i sejsmiczne; efektem jest tu interpretacja i reinterpretacja materiałów archiwalnych, opracowanie map w formacie GIS i opracowanie sprawozdania z badań;

- bezpośredniego sąsiedztwa – w promieniu 5 km (**tab. 1**); efektem jest tu opracowanie wyników badań, sporządzenie dokumentacji, w tym geologiczno-inżynierskiej, przygotowanie załączników graficznych w formacie GIS oraz sprawozdanie z całości wykonanych badań.

W **etapie szczegółowym** dla wybranej lokalizacji w dostosowaniu do wybranej technologii atomowej w promieniu 1 km zostaną wykonane następujące prace:

- badania elektrooporowe,

- wiercenia badawcze geologiczno-inżynierskie,

- sondowania dynamiczne i statyczne gruntów,

- próbne pompowania,

- monitoring geotechniczny i hydrogeologiczny,

- badania laboratoryjne próbek gruntu w warunkach statycznych i dynamicznych,

- badania laboratoryjne próbek wód podziemnych,

- ocena zagrożenia terenu powodzią i/lub podtopieniem,

- opracowanie zebranych materiałów i ich analiza wraz z przygotowaniem map w formacie GIS.

Efektom prac analitycznych oraz interpretacyjnych będzie:

- analiza stanu prawnego i wyników dotychczasowych opracowań,

- reinterpretacja archiwalnych materiałów geofizycznych dla terenu projektowanej elektrowni jądrowej,

Tabela 1

Wstępny zakres prac dokumentacyjnych w promieniu 5 km

The initial scope of documentary works within a radius of 5 km

Dziedzina badań	Metoda badania	Zakres badań
Badania geofizyczne	sejsmika refleksyjna i refrakcyjna	około 100 km profili
	grawimetria	4000 punktów pomiarowych
	metody geoelektryczne i magnetotelluryczne (CSAMT – <i>Controlled-Source Audio-Frequency Magneto-Telluric</i>)	10 profili o łącznej długości 100 km
	sondowania elektrooporowe	profile o łącznej długości 60 km
Wiercenia badawcze	rdzeniowane	7 otworów wiertniczych o głębokości 200 m każdy z wykonaniem geofizyki otworowej
	badawcze w rurach osłonowych	10 otworów o głębokości 50 m każdy
Sondowania dynamiczne i statyczne	sonda statyczna CPTU i/lub sonda dynamiczna DPSH	30 sondowań o głębokości 30 m każde
Badania laboratoryjne próbek gruntu i wody	oznaczenia cech fizycznych i mechanicznych gruntów	–
	analizy stratygraficzne kompleksów osadowych	–
	analizy jakości wód podziemnych	–
Analiza zagrożeń	zebranie i analiza materiałów archiwalnych dotyczących zagrożeń powodzią i/lub podtopieniem oraz zjawiskami geodynamicznymi wraz z przygotowaniem map w formacie GIS	wytypowanie terenów zagrożonych powodzią i/lub podtopieniem oraz zjawiskami geodynamicznymi

Uwaga: podany w tabeli 1 zakres prac i badań należy dostosować do wskazanej lokalizacji

Note: the scope of work and research specified in the table should be adjusted to the indicated location

– analiza stateczności elektrowni jądrowej (określenie oddziaływania grunt–konstrukcja przy pomocy modeli numerycznych oraz analiza zjawisk dynamicznych mogących oddziaływać na konstrukcje obiektów elektrowni) dla wybranych potencjalnych lokalizacji,

– analiza bezpieczeństwa elektrowni jądrowej przy pomocy symulacji numerycznych w aspekcie skutków uwalniania substancji promieniotwórczych do geosfery i biosfery,

– monitoring stateczności podłoża elektrowni metodą interferometrii satelitarnej,

– ocena procesów geodynamicznych i antropogenicznych na badanym terenie,

– wykonanie projektu monitoringu gruntów i wód podziemnych na podstawie międzynarodowych norm i przepisów prawnych dla lokalizacji elektrowni jądrowej.

Uzyskane wyniki powinny stanowić podstawę wyboru optymalnej lokalizacji obiektu jądrowego i umożliwić podjęcie działań związanych z budową oraz uzyskaniem niezbędnych uzgodnień formalnych.

W metodyce prac analitycznych należy uwzględnić:

– zebranie, analizę i ocenę materiałów archiwalnych;

– opracowanie przestrzennego modelu cyfrowego budowy geologicznej wraz z wydzieleniem serii geologiczno-inżynierskich dla wytypowanych lokalizacji elektrowni;

– analizę zagrożeń geotektonicznych oraz potencjalnego skażenia wód podziemnych na podstawie modeli 3D i numerycznych modelowań rozprywu skażeń;

– wstępną charakterystykę geologiczno-inżynierską wybranych lokalizacji elektrowni jądrowej na podstawie materiałów archiwalnych i przeprowadzonych badań; opracowanie materiałów w formie tekstowej i graficznej w formacie GIS;

– opracowanie analizy bezpieczeństwa elektrowni zgodnie z zaleceniami Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej;

– waloryzację poszczególnych lokalizacji elektrowni, która będzie wykorzystywała dane geodynamiczne (kartograficzny obraz neotektonicznej mobilności obszaru Polski), dane geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne, a także dane o zagrożeniach: powodziowym, podtopieniami oraz uszkodzeniach naturalnych i sztucznych zbiorników wodnych;

– charakterystykę ośrodka gruntowego potencjalnych lokalizacji elektrowni na podstawie zebranych informacji środowiskowych, geologiczno-inżynierskich, geofizycznych i hydrogeologicznych w formie tabelarycznej i graficznej w formacie GIS;

– opracowanie zasad wykonania monitoringu gruntu i wód w rejonie elektrowni jądrowej;

– wytypowanie jednej optymalnej lokalizacji elektrowni jądrowej na podstawie powyższych analiz geologiczno-geofizycznych oraz innych kryteriów, w tym zagrożenia geodynamicznego i akceptacji społecznej;

– opracowanie końcowe dla poszczególnych lokalizacji elektrowni jądrowej w formie tekstowej i cyfrowej warstw informacyjnych GIS.

WNIOSKI

1. Kryteria lokalizacji elektrowni jądrowej muszą być zróżnicowane z uwzględnieniem wagi i rangi analizowanych czynników. W pierwszym rzędzie, obok kryteriów wynikających z polityki energetycznej, decydujące powinny być kryteria dotyczące:

- struktur geologicznych, tektoniki i neotektoniki, sejsmiki,
- hydrologii,
- warunków geologiczno-inżynierskich,
- uwarunkowań środowiskowych.

Należy podkreślić, że na etapie wyboru lokalizacji niezbędna jest ocena ilościowych parametrów zagrożeń dotyczących: prawdopodobieństwa występowania zdarzeń sejsmicznych naturalnych oraz indukowanych, spodziewanej lokalizacji epicentrów, energii, przyspieszeń oraz przestrzennych warunków ich propagacji, tłumienia drgań. Celem tego ma służyć dokumentacja geologiczna wykonywana dla oceny zjawisk sejsmicznych oraz uwarunkowań strukturalno-tektonicznych.

2. Dokumentowanie uwarunkowań geologiczno-inżynierskich powinno być podzielone na etapy z uwzględnieniem:

- wyboru alternatywnych lokalizacji,
- dokumentowania dla celów projektowych.

Harmonogram prac dokumentacyjnych w zakresie geologii inżynierskiej powinien zakładać możliwość wykorzystania materiałów roboczych z powstającej dokumentacji geologicznej, wykonywanych dla oceny zjawisk sejsmicznych oraz uwarunkowań strukturalno-tektonicznych.

3. Z uwagi na specyfikę projektowania badań i dokumentowania dla potrzeb elektrowni jądrowych, uzasadnione jest opracowanie specjalistycznej metodyki sporządzania dokumentacji geologicznych uwzględniających:

- dotychczas zebrane doświadczenia,
- etapy dokumentowania,
- wymagania Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1:2008; PN-EN 1997-2:2009) i Eurokodu 8 (PN-EN 1998-1:2005),
- zalecenia IAEA (2002, 2003),
- kryteria waloryzacji terenów rozpatrywanych pod kątem lokalizacji obiektów jądrowych.

Analizy prowadzone dla potrzeb lokalizowania obiektów jądrowych powinny mieć charakter kompleksowy, oparty na szerokim zakresie monitoringu środowiska, a zakres badań dla wszystkich analizowanych lokalizacji powinien być w miarę możliwości ujednoczony, tak aby można było dokonać obiektywnych porównań.

LITERATURA

- GRANICZNY M., 1989 — Fotolineamenty i ich znaczenie geologiczne. *Instrukcje i metody badań geologicznych*, zes. 50. Wyd. Geol., Warszawa.
- IAEA, 2002 — Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series. Safety Guides, no. NS-G-3.3, Vienna.
- IAEA, 2003 — Site Evaluation for Nuclear Installations. Safety Standards Series. Safety Requirements, no. NS-R-3, Vienna.
- IAEA, 2004 — Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series, no. NS-G-3.6, Vienna.
- IAEA, 2011 — Safety Aspects in Siting for Nuclear Installations. Draft Specific Safety Guide Safety Standards Series, no. DS433 Draft 00.08, Vienna.
- PN-EN 1998-1:2005 — Eurokod 8 – Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym. Część 1 – Reguły ogólne, oddziaływania sejsmiczne i reguły dla budynków (ang.). PKN, Warszawa.
- PN-EN 1997-1:2008 — Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 1 – Zasady ogólne. PKN, Warszawa.
- PN-EN 1997-2:2009 — Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 2 – Rozpoznanie i badania podłoża gruntowego. PKN, Warszawa.
- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA SPRAW WEWNĘTRZNYCH I ADMINISTRACJI z dnia 24 września 1998 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. Nr 126, poz. 839).
- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie projektów prac geologicznych (Dz.U. Nr 153, poz. 1777).
- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 3 października 2005 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinny odpowiadać dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie (Dz.U. Nr 201, poz. 1673).
- USTAWA z dnia 29 listopada 2000 r. – Prawo atomowe (Dz.U. Nr 3, poz. 18, z późniejszymi zmianami).
- USTAWA z dnia 13 maja 2011 r. – O zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. Nr 132, poz. 766).
- USTAWA z dnia 29 czerwca 2011 r. – O przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (Dz.U. Nr 135, poz. 789, z późniejszymi zmianami).
- WYSOKIŃSKI L., 2009 — Projektowanie geotechniczne od klasyfikacji gruntów do monitoringu obiektu według norm europejskich. *W: Materiały XXIV Ogólnopolskich Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji*, Wisła, 17–20.03.2009, 1: 291–318.

SUMMARY

Nuclear power facilities planning is a subject of many legal regulations, including the Act "Geological and Mining law". According to this act, engineering-geological documentations for identifying geotechnical conditions for the foundation of building structures are pointed. Nuclear facilities planning and designing is one of the top priorities and the Minister of the Environment is a body of first instance. Legal acts, European and Polish geotechnical standards, recommendations of the International Atomic Energy Agency (IAEA) constitute basis for further methodological works concerning analysis of ground conditions for nuclear power facilities. The process of choosing the location of nuclear power facilities includes 3 steps: (1) selection of locations, (2) verification of chosen options by taking into ac-

count the established criteria, (3) formulation of location's and grounds' conditions which are indispensable for planning works. The works undertaken in accordance with legal articles should take into consideration potential threats due to changes of ground conditions. All aspects of natural and induced by human seismicity should be analysed and areas exposed to tremors must be eliminated from possible locations of a nuclear power plant.

The problematic soils (organic soils, expansive soils, loess, residual soils) and/or geological phenomena implying complicated ground conditions (glacitectonics, karst forms, coastal and inland waters erosion, geodynamic processes, internal erosion) must be thoroughly checked in regional and detailed engineering-geological analysis.

