

Spis treści

Aleksander KIRYLUK, Jacek LESZCZYŃSKI, Adam ŁUKOWSKI, Rafał MIŁASZEWSKI, Janina PIEKUTIN, Anna SIEMIENIUK, Elżbieta SKORBIŁOWICZ, Mirosław SKORBIŁOWICZ, Joanna SZCZYKOWSKA, Józefa WIATER, Elżbieta ŻEBRANOWICZ Źródło zanieczyszczeń wód powierzchniowych i wybrane metody ich oczyszczania <i>Sources of surface water pollution and some methods of treatment</i>	49
Jarosław KRĄŻELEWSKI, Olgierd PUŁA Zabezpieczenie głębokiego wykopu wewnątrz Hali Stulecia we Wrocławiu <i>Deep excavation support system inside the Centennial Hall in Wrocław</i>	59
Anna OSTROWSKA-BUĆKO Zagospodarowanie energii wiatru przy użyciu małych turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu <i>Wind energy utilisation based on small vertical axis wind turbines</i>	65
Joanna PIOTROWSKA-WORONIAK, Grzegorz WORONIAK Redukcja emisji zanieczyszczeń w wyniku termomodernizacji zabytkowych obiektów sakralnych <i>Reduction of emission pollution as a result of thermomodernisation historic sacral buildings</i>	73
Wojciech SAS, Andrzej GŁUCHOWSKI Trójosiowe obciążenia cykliczne podłoża gruntowego w budownictwie drogowym <i>Cyclic triaxial tests of subgrade soils in road construction</i>	79

WYDARZENIA	
Katarzyna ZABIELSKA-ADAMSKA <i>Profesor Eugeniusz Dembicki Doktorem Honorowym Politechniki Białostockiej</i>	87

ŹRÓDŁO ZANIECZYSZCZEŃ WÓD POWIERZCHNIOWYCH I WYBRANE METODY ICH OCZYSZCZANIA

**Aleksander KIRYLUK, Jacek LESZCZYŃSKI, Adam ŁUKOWSKI,
Rafał MIŁASZEWSKI, Janina PIEKUTIN, Anna SIEMIENIUK,
Elżbieta SKORBIŁOWICZ, Mirosław SKORBIŁOWICZ, Joanna SZCZYKOWSKA,
Józefa WIATER, Elżbieta ŻEBRANOWICZ***

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Celem pracy było określenie źródeł zanieczyszczeń wód powierzchniowych i wybranych metod ich usuwania. Wody powierzchniowe zanieczyszczane są poprzez substancje migrujące z gleb oraz poprzez spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy. Źródłami antropogenicznymi są melioracje komunikacja, rolnictwo i inne. Jedną z metod oczyszczania wód z jonów amonowych jest stosowanie metody wymiany jonowej z użyciem zwietrzeliny bazaltowej. Natomiast związki ropopochodne skutecznie mogą być usuwane metodą ultrafiltracji.

Słowa kluczowe: wody powierzchniowe, zanieczyszczenia, metody usuwania.

1. Wstęp

Woda jest dobrem naturalnym, a jej zasoby na kuli ziemskiej są w miarę stałe. Rozmieszczenie zasobów jest nierównomierne. Tylko niewielka część wód to wody słodkie, które nadają się na cele konsumpcyjne, komunalne i przemysłowe. Woda występuje w różnych stanach skupienia i jest dobrym rozpuszczalnikiem, łatwo się przemieszcza i przenika w środowisku, co powoduje, że przechodzą do niej różne substancje. Substancje te mogą pochodzić ze źródeł naturalnych i antropogenicznych i często pogarszają jakość wód. Zanieczyszczenia antropogeniczne są najczęściej allochtoniczne czyli dopływające z zewnątrz (Ilnicki, 2004). Źródłem zanieczyszczeń są tereny przemysłowe zurbanizowane i rolnicze. Trafiają one do wód powierzchniowych, które często są źródłem wody pitnej dla ludzi i w celu usunięcia z nich zanieczyszczeń podlegają pewnym procesom technologicznym.

W artykule przedstawiono wyniki prac zespołu Katedry Technologii w Inżynierii i Ochronie Środowiska dotyczące identyfikacji źródeł zanieczyszczenia wód powierzchniowych oraz wybrane metody ich oczyszczania oraz metody ekonomiczne służące wycenie dóbr środowiskowych.

2. Zanieczyszczenia obszarowe i ich wpływ na jakość wód powierzchniowych

Od początku swego istnienia rzeki ulegają wzbogacaniu w składniki mineralne. Proces ten potęgowany jest przez ich dopływ z terenów przemysłowych, zurbanizowanych i rolniczych. Składniki mineralne trafiają do rzek ze źródeł obszarowych i punktowych znajdujących się na obszarze zlewni a ich ilość w wodach rzecznych zależy od wielu czynników przyrodniczo-gospodarczych (Ilnicki, 2004).

Ładunek zanieczyszczeń (iloczyn stężenia i przepływu) jest miarą pozwalającą na ocenę wpływu sposobu użytkowania zlewni na zanieczyszczenie wód, a w szczególności na wynoszenie składników poza zlewnię. Pozwala na określenie udziału zanieczyszczeń pochodzących z różnych źródeł, na przykład obszarowych, punktowych, itp. w zanieczyszczeniu danego cieku czy zbiornika wodnego (Hansen i in., 2000; Pulikowski i in., 2001; Pulikowski, 2004).

Badania wykonywano raz w miesiącu w latach 2001-2005. W próbkach wody oznaczano stężenie N-NFLÓ, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, P-PO₄³⁻, S-SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Fe, Zn metodami uznawanymi powszechnie za referencyjne. Obliczano ładunki jednostkowe [kg/ha/rok] składników migrujących ze zlewni do rzek, co było podstawą do określenia wpływu zlewni na jakość wód rzecznych. Na podstawie ładunków jednostkowych określano przestrzenne zróżnicowanie wynoszenia badanych składników ze zlewni poszczególnych rzek.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: e.zebranowicz@p.edu.pl

Ładunki jednostkowe składników odpływających z poszczególnych zlewni przedstawiają ich wpływ na wody powierzchniowe. Można je również określić mianem spływu powierzchniowo-podpowierzchniowego, które wspólnie z częścią płytkich wód gruntowych obrazują źródła powierzchniowe badanych składników. Jeżeli chodzi o ładunki składników migrujących ze zlewni do wód rzecznych to największe odnotowano w zlewni Orlanki. Były to ładunki N-NH₄, N-NO₂, P-PO₄, S-SO₄, Cl-Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ (tab. 1). Największy ładunek N-NO₃ odpływał ze zlewni Supraśl. Zlewnia Narewki charakteryzowała się największym odpływem Fe^{2+/3+}. Zlewnia Orlanki jest użytkowana rolniczo. Skutkuje to zwiększonym dopływem składników mineralnych z jej obszaru. Podobna pod względem wielkości do zlewni Orlanki jest zlewnia Narewka, ale masa odpływających ładunków jest ponad dwa razy mniejsza. Wynika to przede wszystkim z charakteru tej zlewni, która jest w znacznej mierze zalesiona, co objawiło się zwiększonym odpływem Fe²⁺ w jej zlewni. Odpływ składników mineralnych ze zlewni zalesionych jest mniejszy, co potwierdzają obliczone ładunki odpływające w zlewni Supraśli. Badania wykazały istotną zależność między średniorocznym ładunkiem jednostkowym P-PO₄³⁻ a procentowym udziałem lasów w badanych zlewniach górnej Narwi wyrażoną współczynnikiem Pearsona -0,65 oraz zależność odwrotną, ładunek jednostkowy i procentowy udział gruntów ornych, wyrażoną współczynnikiem Pearsona 0,66.

Tab. 1. Ładunki składników mineralnych w kg/ha/rok odpływające ze zlewni poszczególnych rzek w latach 2001-2005

	Narew	Supraśl	Narewka	Orlanka
N-NH ₄	0,6	1,52	0,39	1,62
N-NO ₂	0,02	0,109	0,019	0,167
N-NO ₃	2,45	8,29	0,95	4,82
P-PO ₄	0,38	0,33	0,22	1,00
S-SO ₄	26,5	23,3	10,87	37,4
Cl	40,7	42,6	17,3	82
Ca ²⁺	124,6	87,2	80,3	171,1
Mg ²⁺	21	22,1	10,7	30,7
Na ⁺	26,4	13,8	9,5	50,8
K ⁺	9,7	7,4	4,6	20,8
Fe ^{2+/3+}	0,211	0,684	0,755	0,452
Zn ²⁺	0,052	0,048	0,026	0,043

3. Zabiegi melioracyjne źródłem zanieczyszczeń wód

Zabiegi melioracyjne wykonane na glebach organicznych są źródłem zanieczyszczeń wód gruntowych i powierzchniowych. Ustalenie źródeł zanieczyszczeń wód w ciekach przepływających przez tereny bagienne i pobagienne może być trudne, gdyż zwiększone przenikanie biogenów i węgla w okresach nasilonych spływów wód powierzchniowych może zwiększać barwę

wody i maskować inne źródła zanieczyszczeń. Badania wykonane na obiekcie Supraśl Dolna wykazały, że w 2004 roku w miesiącu lipcu i w sierpniu w rzece Supraśl w okresach zwiększonych przepływów występowały zmiany barwy wody i zapachu powodowane głównie zwiększoną zawartością substancji humusowych, a tym samym wzrostem stężenia rozpuszczonego węgla organicznego. Badania próbek wody nie wykazywały równocześnie ponadnormatywnych stężeń form azotu. Badania Bali i in. (2002) wskazują na eutrofizację wód przepływających przez torfowiska niskie. Wody po przepłynięciu przez torfowisko niskie zawierały o 5 mg/dm³ więcej rozpuszczonego węgla.

Wyższe stężenie amoniaku stwierdzono w wodach gruntowych na łące użytkowanej ekstensywnie i wynosiło ono 2,06 mg/dm³. Amoniak w wodach powierzchniowych odpływających rowami melioracyjnymi występował w niskim stężeniu nie przekraczającym 0,20 mg/dm³. W rowach odprowadzających wodę występuje sporo roślin, które wykorzystują jony amonowe, stąd ich stężenie jest niskie. Ponadto znaczne ilości amoniaku powstającego w procesie mineralizacji masy torfowej ulatnia się do atmosfery (Pawałaczyk i in., 2002).

Na badanym obiekcie najwyższe stężenia jonów azotanowych stwierdzono na ekstensywnie użytkowanej łące w wodach gruntowych i wynosiło ono 4 mg/dm³. Łąka ta charakteryzowała się silnie zmurszałą warstwą wierzchnią torfu i brakiem zwartej wielogatunkowej darni. Takie warunki są sprzyjające do znacznego uwalniania jonów amonowych. Stężenia jonów azotanowych w badanych wodach powierzchniowych były niższe od wartości granicznej dla wód klasy I. Nie stwierdzono wyraźnych sezonowych zmian stężeń azotanów w wodach pochodzących z badanego torfowiska

Stężenia fosforanów wynosiły średnio w wodach gruntowych 1,55 mg/dm³ (tab. 2) i 1,13 w wodach powierzchniowych. Wysokie stężenia fosforanów w wodach gruntowych 1,55 mg/dm³ pochodziło głównie z nawozów mineralnych stosowanych na obiekcie a także z wylewów wód z rzeki Supraśli w okresie wczesnowiosennym. Gleby torfowe są raczej ubogie w fosfor. Stężenia fosforanów były wysokie i powodowały silną eutrofizację wód. Na tak wysokie stężenia fosforanów wpływał także powolny ruch wody w środowisku glebowo-wodnym torfowiska, gdyż woda w rowach często stagnuje. Także wysoka zawartość OWO, który ma zdolności wiązania fosforu miała wpływ na stężenie fosforanów w wodach (Górniak i Zieliński, 1999). Ze względu na stężenia jonów fosforanowych, odpływające wody z torfowiska klasyfikuje się do V klasy jakości.

Murszenie gleb pobagiennych powoduje powstawanie znacznych ilości węgla organicznego (OWO). Uzyskane wyniki wskazują, że stężenia OWO, są dość wysokie, powyżej 50 mg/dm³ co jest charakterystyczne dla wód z silnie murszejących gleb pobagiennych (Zabiegała, 2004). Wyższe stężenia OWO, wystąpiły w wodach gruntowych i wynosiły one średnio 67,9 mg/dm³. Wysokie stężenia węgla w wodach gruntowych i powierzchniowych odpływających z torfowiska jest przyczyną okresowych

Tab. 2. Stężenia biogenów i węgla organicznego w wodach gruntowych torfowiska zmeliorowanego

Sposób użytkowania	Terminy pobrania próbek	Składnik [mg/dm ³]				
		N- NH ₄	N- NO ₂	N-NO ₃	PO ₄	OWO
ekstensywny	marzec	0,63	0,05	1,9	2,81	72,1
	czerwiec	2,06	śl	4,0	2,30	78,8
	październik	1,07	0,01	2,1	1,75	69,0
intensywny	marzec	0,43	0,00	1,8	0,45	68,8
	czerwiec	1,76	0,00	2,3	1,12	61,5
	październik	0,87	0,00	1,7	0,89	57,3
Średnia		1,15	0,01	2,3	1,55	67,8
Odchylenie standartowe		0,64	0,01	0,8	0,84	7,2
Minimum		0,39	0,00	1,6	0,45	57,3
Maksimum		2,28	0,05	4,0	2,81	79,3

wzrostów stężeń tego składnika w wodach rzecznych. W warunkach normalnych w ciekach naturalnych stężenia OWO, nie przekracza 10 mg/dm³ (Barańkiewicz i Siepak, 1994; Górniak i Zieliński, 1999; Zabiegała, 2004). Przy zwiększonych spływach wód z torfowisk do rzek w okresach wiosennych lub podczas zwiększonych opadów mogą przedostawać się do rzek znaczne ilości związków humusowych. Barwa wody w rzekach wzrasta wraz wzrostem stężenia OWO i jest łatwym wskaźnikiem oceny jakości wody (tab. 3).

Wody powierzchniowe po przepłynięciu przez torfowisko niskie zawierają o 30 % więcej jonów (Balía i in., 2000) w tym głównie wzrasta zawartość jonów węglanowych HCO₃⁻ i żelaza ogólnego.

Na wysokość stężeń biogenów w wodzie z rowów miały wpływ występujące masowo rośliny w tym głównie *Glyceria numma*, *Typha angustifolia* oraz *Lemna minor*. Gatunki te pobierają znaczne ilości azotu i fosforu, dlatego ich występowanie [ilościowość] jest ważnym wskaźnikiem stanu czystości wód (Staniszewski i in., 2004). Regularne wykaszanie roślinności w rowach na torfowisku powoduje usuwanie nagromadzonych biogenów, a nowa roślinność przyczynia się do zmniejszania ich stężenia w wodach.

Porównanie stężenia biogenów i węgla w badanych wodach z wartościami granicznymi wskaźników określonych w Rozporządzeniu w sprawie klasyfikacji dla prezentowania stanów wód powierzchniowych i podziemnych (Dz. U. z 2004, Nr 32, poz. 284) wynika, że wody powierzchniowe ze względu na wysokie stężenia fosforanów, wynoszące średnio 1,3 mg/dm³ i stężenia OWO, wynoszące 57,4 mg/dm³ znajdują się w V klasie czystości. Wysokie zawartości węgla OWO i fosforanów w wodach gruntowych stanowią mniejsze bezpośrednie zagrożenie środowiska niż w wodach powierzchniowych.

4. Źródła zanieczyszczeń wód w zbiornikach retencyjnych

Małe zbiorniki wodne mogą być odbiornikami różnych zanieczyszczeń ze zlewni i ich wody należy poddawać częstej kontroli, ponieważ położone w pobliżu miejscowości, spełniają wiele różnorodnych zadań i funkcji. Najczęstsze i najważniejsze to ochrona przeciwpożarowa, zaspokajanie potrzeb rybactwa oraz potrzeb wypoczynku, sportu i rekreacji.

Od 2005 roku prowadzone są cykliczne badania jakości wody w zbiornikach retencyjnych

Tab. 3. Stężenia biogenów i węgla organicznego w wodach odpływających rowami z torfowiska zmeliorowanego

Sposób użytkowania	Terminy pobrania próbek	Składnik [mg/dm ³]				
		N-NH ₄	N-NO ₂	N-NO ₃	PO ₄	OWO
ekstensywny	marzec	0,17	0,00	0,4	1,75	62,4
	czerwiec	0,07	0,00	1,9	1,12	52,8
	październik	0,20	0,00	0,3	1,07	62,3
intensywny	marzec	0,15	0,05	0,2	0,90	59,3
	czerwiec	0,05	0,00	1,3	0,80	50,5
	październik	0,10	0,00	1,5	1,15	57,6
Średnia		0,12	0,01	1,0	1,06	57,4
Odchylenie standardowe		0,05	0,01	0,6	0,23	4,8
Minimum		0,05	0,01	0,2	0,80	50,5
Maksimum		0,22	0,05	1,9	1,75	64,3

zlokalizowanych w następujących miejscowościach województwa podlaskiego: Zarzeczany, Białystok-Dojlidy, Wasilków, Czarna Białostocka, Sokółka, Korycin, Jasionówka oraz największym w północno-wschodniej Polsce zbiorniku Siemianówka (tab. 4).

Obserwacje przestrzennego rozkładu badanych wskaźników w analizowanych akwenach wykazały, że zbiorniki: Siemianówka, Dojlidy, Sokółka, Wasilków i Czarna Białostocka nie posiadały zdolności do samooczyszczania, ponieważ porównanie wyników badań w przekroju podłużnym zbiorników powinno wykazać obniżenie zawartości wszystkich badanych parametrów, co nie miało miejsca w badanych akwenach. Należy również podkreślić, iż „starsze” zbiorniki wykazywały dużą niestabilność jakości wody. Analiza przestrzennego rozkładu w akwenach: Zarzeczany, Jasionówka i Korycin wykazała, iż zbiorniki te w większości przypadków posiadają zdolność do samooczyszczania się wód, a jakość ich wód spowodowana jest jedynie zmianami sezonowymi. W tabeli 5 podano przykładowe zmiany sezonowe zanieczyszczeń wód zbiornika zlokalizowanego na cieku Czapielówka.

Korzystne parametry morfometryczne „młodych” zbiorników oraz niewielka powierzchnia ich zlewni

całkowitej powodują, akweny te są stosunkowo odporne na degradację, jednak położone na ich obrzeżach obiekty usługowe, pola biwakowe oraz kąpieliska wpływają niekorzystnie na jakość wód zbiorników, szczególnie w sezonie letnim.

Naturalne cechy zbiorników i zanieczyszczenia dopływające z ich zlewni bezpośrednio wpływają łącznie na jakość wód, zaś obecność źródeł punktowych w zlewni bezpośrednio determinuje stan czystości wody bez względu na warunki naturalne zbiornika i zlewni

Zbiorniki zaporowe są specyficznym rodzajem wód powierzchniowych, różniącym się zarówno od rzek, jak i od jezior. Powstałe w wyniku spiętrzenia powierzchniowych wód płynących, odznaczają się swoistym przepływem i mieszaniami się wód oraz charakteryzują się właściwym dla siebie układem warunków termiczno - tlenowych oraz innymi cechami fizyko - chemicznymi i biologicznymi. Małe zbiorniki wodne mogą być odbiornikami różnych zanieczyszczeń ze zlewni i ich wody należy poddawać częstej kontroli, ponieważ położone w pobliżu miejscowości, spełniają wiele różnorodnych zadań i funkcji. Najczęstsze i najważniejsze to ochrona przeciwpożarowa, zaspokajanie potrzeb rybactwa oraz potrzeb wypoczynku, sportu i rekreacji.

Tab. 4. Podstawowe dane analizowanych akwenów

Zbiornik	Ciek wodny	Data powstania	Powierzchnia [ha]	Głębokość [m]
Zarzeczany	Gledniówka	2000	8,75	1,72
Dojlidy	Biała	1979	34	2
Jasionówka	Brzozówka	2001	2,03	2
Korycin	Kumiałka	2002	6,8	2
Siemianówka	Narew	1977-1992	3250	1-7
Czarna Białostocka	Czapielówka	1971-1981	16,3	2
Sokółka	Sokołda	1940	18,3	1,75
Wasilków	Supraśl	1968	12	2,5

Tab. 5. Podstawowe dane statystyczne parametrów wody zbiornika Czapielówka 2005/11

Badany parametr	Jednostka	Min	Max	Średnia	Błąd standardowy	Odchylenie standardowe	Mediana
Barwa pozorna	mg Pt/dm ³	27	172,0	95,8	4,37	30,27	94
Barwa rzeczywista	mg Pt/dm ³	12	132,0	71,5	4,61	31,95	70
Mętność	NTU	0,98	31,0	10,6	1,12	7,82	9,05
odczyn	pH	6,2	8,93	8,0	0,10	0,68	8,05
Przewodność	μS/cm	289	481	413,1	8,61	56,18	435
Żelazo	mgFe/dm ³ mg m	0,01	2,01	0,24	0,07	0,46	0,12
Mangan	mg Mn/dm ³	0,012	0,31	0,12	0,01	0,10	0,07
Jon amonowy	mg NH ₄ /dm ³	n.w.	0,57	0,29	0,02	0,16	0,25
Azotany (III)	mg NO ₂ /dm ³	0,013	0,056	0,028	0,001	0,008	0,027
Azotany (V)	mg NO ₃ /dm ³	0,44	8,36	2,16	0,23	1,59	1,76
TKN	mg TKN/dm ³	1,258	10,01	4,36	0,29	2,03	3,97
Fosforany	mg PO ₄ /dm ³	0,05	2,75	0,53	0,08	0,57	0,34
Utlenialność	mg O ₂ /dm ³	3,2	16,0	8,99	0,49	3,44	9,40

5. Usuwanie jonu amonowego metodą wymiany jonowej z zastosowaniem zwietrzliny bazaltowej

Wody powierzchniowe często są źródłem wody pitnej dla ludności. Zanieczyszczone muszą być poddane różnym procesom technologicznym. Jednym z uciążliwych zanieczyszczeń jest azot amonowy, który może być usuwany przez stosowanie zeolitów, którymi są glinokrzemiany.

Naturalne glinokrzemiany ze względu na swoje właściwości jonowymienne i sorpcyjne mogą być szeroko stosowane, szczególnie w inżynierii środowiska. Główne fizykochemiczne właściwości zeolitów to duża pojemność adsorpcyjna, selektywność, pojemność jonowymienne oraz odporność na działanie kwasów i podwyższonej temperatury (Jorgensen i in., 1976; Booker i in., 1996)

Badania prowadzono z zastosowaniem zwietrzliny bazaltowej, której złożo zlokalizowane jest w województwie dolnośląskim. Zwietrzelina bazaltowa jest skałą drobnoziarnistą barwy jasno-szarej, zasadniczymi składnikami mineralnymi są glinokrzemiany: hydrohaloizyt, haloizyt oraz getyt i hematyt. Dotychczas stosowana była jako nośnik katalizatorów, ziemia odbarwiająca oraz sorbent (Rutkowski, 2001).

Przygotowanie granulatu przetworzonej skały do badań polegało na wytrawianiu stężonym kwasem siarkowym, prażeniu, przemywaniu wodą destylowaną. Następnie masę suszono w 105°C oraz regenerowano roztworem NaCl o stężeniu 0,5 mol/dm³ i pH 11,5 stosując 4-krotny nadmiar solanki w stosunku do objętości granulatu.

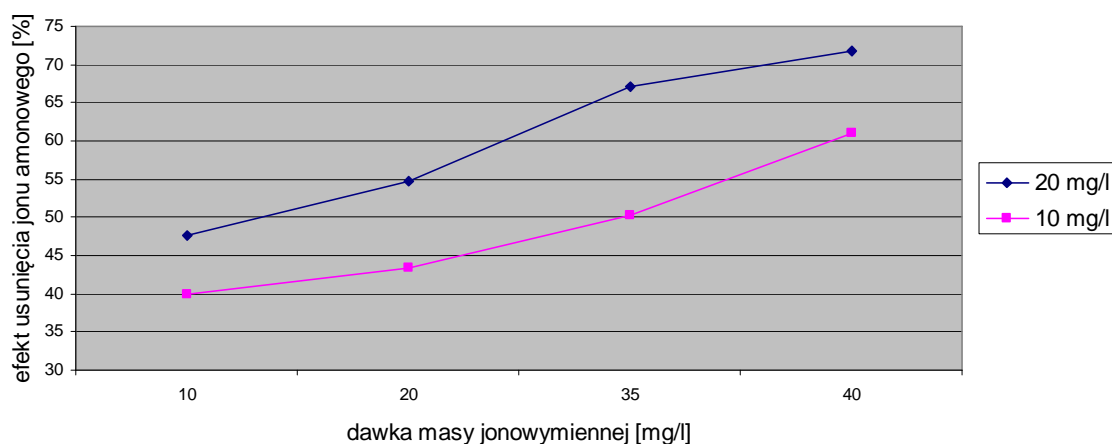
Badania technologiczne prowadzono na wodzie modelowej preparowanej z wody wodociągowej. Woda do badań charakteryzowała się odczynem 7,55 pH, twardością ogólną 4,81 mval/dm³, zasadowością ogólną 3,78 mval/dm³, stężeniem wapnia 3,64 mval/dm³. Jon amonowy dawkowano w postaci roztworu NH₄Cl, do korekty pH wykorzystywano HCl i NaOH. Podczas badań oznaczano pH, jon amonowy, twardość ogólną, oraz wapń. Jon amonowy oznaczono metodą Neslera, twardość i wapń metodą miareczkową z EDTA według metodyki (Wanga i in., 2007). W warunkach statycznych badano efektywność usuwania jonu amonowego

w zależności od dawki glinokrzemianu i stężenia jonu amonowego. Wpływ dawki na skuteczność usuwania jonu amonowego badano stosując 4 dawki zregenerowanej zwietrzliny bazaltowej w ilości: 10, 20, 35 i 40 g/dm³ wody. Wpływ stężenia jonu amonowego na efektywność procesu badano w przy stężeniu 10 i 20 mgNH₄/dm³. Tak przygotowane próbki wytrząsano na wytrząsarce laboratoryjnej przez 30 minut.

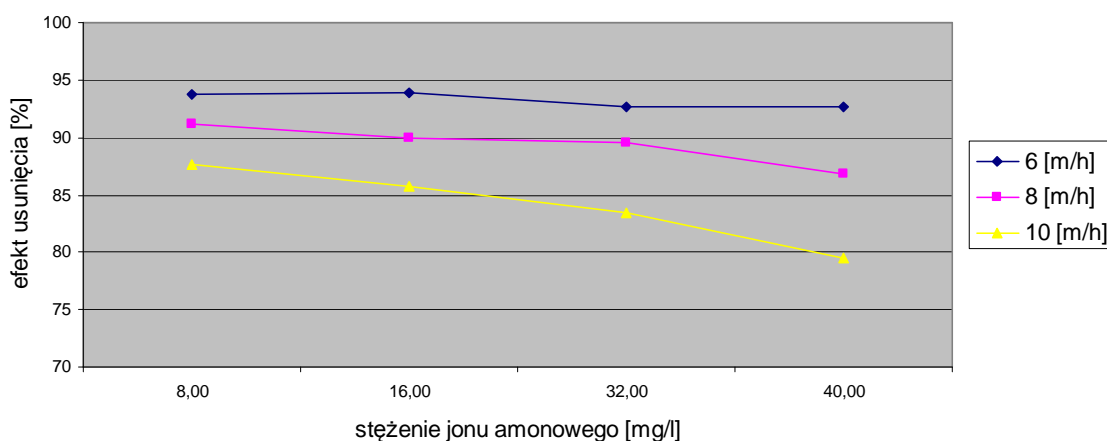
W zależności od odczynu najwyższy efekt usunięcia jonu amonowego 93,0% uzyskano przy pH 6. Podobne rezultaty w swojej pracy przedstawiają Koon i Kauffman (1975). Wpływ pH na efekt usunięcia jonu amonowego związany jest głównie z formą występowania jonu amonowego oraz mechanizmem wymiany jonowej. Wzrost odczynu do wartości powyżej 9,0 powoduje przejście formy jonowej NH₄⁺ w formę gazową NH₃, która pozbawiona ładunku dodatniego nie ulegała wymianie jonowej. Spadek odczynu poniżej pH 6 zwiększa stężenia jonów H⁺, które stają się konkurencyjnymi w stosunku do jonów amonowych (Koon i Kauffman, 1975).

W badaniach nad wpływem dawki zwietrzliny na efektywność procesu, przy najmniejszej dawce i stężeniu 20 mg NH₄/dm³ efektywność usunięcia jonu amonowego wynosiła 47,6%, natomiast przy największej dawce – 71,8%. Natomiast efektywność usuwania twardości ogólnej po procesie wynosiła 36,0% przy najmniejszej dawce oraz 58,3% przy dawce największej. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 1. Po procesie zaobserwowano wzrost efektu usunięcia jonu amonowego wraz ze wzrostem jego stężenia początkowego. Podobną zależność uzyskali Wanga i współautorzy (Wanga i in., 2006, 2007).

Wyniki badań w warunkach przepływowych przedstawiono na rysunku 2. Skuteczność procesu badano w zależności od prędkości filtracji 6, 8, 10, m/h oraz stężenia jonu amonowego 8 do 40 mg/dm³. Efektywność procesu zmniejszała się wraz ze wzrostem stężenia jonu amonowego oraz wraz ze wzrostem prędkości filtracji. Najwyższy efekt usunięcia jonu amonowego 93,9% zaobserwowano przy prędkości 6 m/h w próbce o stężeniu początkowym jonu amonowego 16 mg NH₄⁺/dm³.



Rys. 1. Efekt usunięcia jonu amonowego w zależności od dawki i stężenia NH₄



Rys. 2. Efekt usunięcia jonu amonowego w zależności od stężenia i prędkości filtracji

Przeprowadzone w skali laboratoryjnej badania wskazują na możliwość wykorzystania zwietrzliny bazaltowej w procesie usuwania jonu amonowego metodą wymiany jonowej. Jednakże obecność innych kationów, głównie wapnia i magnezu zmniejsza skuteczność procesu. Na efektywność usuwania jonu amonowego znaczący wpływ wywiera odczyn roztworu. Najlepszy rezultat uzyskano przy pH 6, natomiast przy pH 4 i 5 oraz 9 efektywność usuwania jonu NH_4^+ jest mniejsza. Efektywność procesu w układzie przepływowym zależy głównie od prędkości filtracji, jak również od stężenia jonu amonowego oraz obecności jonów wapnia i magnezu. Nie zaobserwowano natomiast istotnych zmian w zakresie efektywności usuwania badanych wskaźników w zależności od sposobu przygotowania zwietrzliny do badań (Leszczyński, 2009).

6. Zanieczyszczenie wody substancjami ropopochodnymi i ich usuwanie

W wodach powierzchniowych coraz częściej występują zanieczyszczenia pochodzące ze źródeł liniowych jakimi są drogi. Tranzytowe położenie województwa podlaskiego między wschodem i zachodem Euroazji spowodowało znaczną intensyfikację przewozów drogowych i kolejowych, zwiększając ryzyko powstania zagrożeń. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu na drogach wzrasta również ilość substancji ropopochodnych. Na Podlasiu wpływ środków transportu na zanieczyszczenie wody powierzchniowe jest wyższy niż większości gałęzi przemysłu, co wynika z przestawienia się z produkcji na działalność usługową.

Stwierdzone stężenia badanych zanieczyszczeń komunikacyjnych świadczą o ich migracji do wody powierzchniowej, należy więc przypuszczać, że ich ilość będzie rosła w miarę przyrostu natężenia ruchu. Zanieczyszczenia tymi składnikami jest niebezpieczne dla życia biologicznego na skutek tworzenia powierzchniowych i zemulgowanych warstw odcinających dopływ tlenu atmosferycznego, a także sedymentacji cięższych frakcji nierozpuszczalnych w wodzie oraz toksycznego oddziaływania związków rozpuszczonych.

Zostały przeprowadzone badania jakości wód rzecznych pod kątem koncentracji substancji ropopochodnych. Punkty poboru próbek były zlokalizowane w kilku wariantach na rzekach poprzecinanych dużą i małą ilością tras komunikacyjnych o różnym natężeniu ruchu oraz trasy o różnej jakości nawierzchni. Substancje ropopochodnych zostały wykonane metodą referencyjną do tych związków oraz dodatkowo oznaczony indeks oleju mineralnego. Ilość próbek do badań w wyznaczonych punktach poboru wynikała z wytycznych statystycznych dla wiarygodności danych w tych samych warunkach. Przeprowadzone badania wód na Podlasiu w kierunku substancji ropopochodnych i węglowodorów ropopochodnych potwierdzały zawartość tych zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych i podziemnych. Największe stężenia ropopochodnych zanotowano w pobliżu tras komunikacyjnych o dużym natężeniu ruchu.

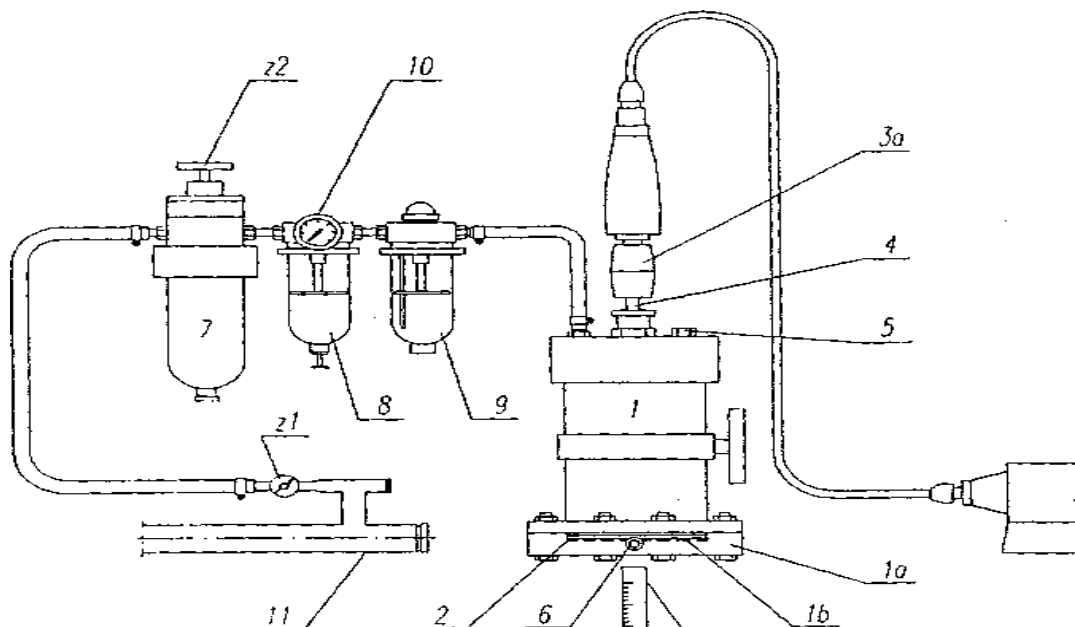
Celem badań jest analiza możliwości wykorzystania procesów NF i UF do usuwania ich z wody wykorzystując proces ultrafiltracji i nanofiltracji. Badania zostały zaplanowane w celu realizowania w ujęciu kompleksowym od rozpoznania „wagi” problemu do działań praktycznych, poprzez określenia jakości i ilości substancji ropopochodnych, usunięcie z wody w procesie membranowym uzyskując parametry wody do picia. Schemat aparatury do badań przedstawiono na rysunku 3.

Coraz częściej w procesach oczyszczania wód powierzchniowych wykorzystywane są metody membranowe. Idea tego systemu polega na rozdzieleniu składników mieszaniny na skutek jej przepływu przez warstwę porowatą. Rodzaj procesu membranowego uzależniony jest od siły napędowej i wielkości rozdzielanych cząstek.

Do technik membranowych zaliczyć można dwa podstawowe procesy wykorzystywane przy oczyszczaniu gruntu *in situ*:

- ultrafiltracja,
- nanofiltracja.

Proces ultrafiltracji jest prowadzony jako filtracja pod wysokim ciśnieniem, która wykorzystuje porowate membrany do rozdzielania zawieszonych cząstek o bardzo



Rys. 3. Schemat aparatury do prowadzenia procesu ultrafiltracji: I – zbiornik główny, 1a – dno zbiornika głównego, 1b – siatka podtrzymująca membrany, 2 – membrana ultrafiltracyjna, 3 – mieszalnik laboratoryjny, 3a – uchwyt mieszadła, 4 – mieszadło łopatkowe, 5 – rura odpowietrzająca, 6 – króciec odprowadzający permeat, 7 – zbiornik wyrównawczy, 8, 9 – odolejające, 10 – manometr, 11 – rurociąg doprowadzający sprężone powietrze, 12 – cylinder pomiarowy, z1 – zawór kulowy, z2 – zawór grzybkowy

małych średnicach. Ultrafiltracja i nanofiltracja rozdziela nasyconą parę na dwie frakcje na podstawie rozmiaru cząsteczek. Wodę modelową ze związków ropopochodnych oczyszczano w procesie ultrafiltracji osiągając średnią 67,8% efekt usunięcia badanych związków, w przypadku nanofiltracji osiągnięto zaś 99,9% efekt.

7. Metoda wyceny warunkowej do wyceny dóbr środowiskowych

Niewątpliwie wiele zanieczyszczeń w wodach to skutek dopływających do nich zanieczyszczeń ze ścieków komunalnych oczyszczonych i nieoczyszczonych. Ważne jest zatem ograniczanie migracji tych zanieczyszczeń, szczególnie w obszarach wiejskich poprzez budowę oczyszczalni ścieków komunalnych konwencjonalnych jak i alternatywnych (przysagrodowych). Ludzie muszą uznać brak wody za istotny problem, aby byli gotowi zapłacić za oczyszczanie ścieków.

W ramach polsko-greckiej współpracy naukowo-badawczej, kierowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego wykonano projekt badawczy na temat: „Ocena gotowości do zapłaty za oczyszczanie ścieków i zamykanie obiegów wodnych”.

Celem realizacji projektu badawczego była ocena możliwości akceptacji, przez mieszkańców wybranych gmin na terenie województwa podlaskiego w Polsce, budowy systemu zbiorowego odprowadzania i oczyszczania ścieków oraz ocena gotowości mieszkańców tych gmin do zapłaty za realizację tego systemu. Strona polska zobowiązała się podjąć badania w wybranych gminach, w których nie było dotychczas zbiorowego systemu odprowadzania i oczyszczania

ścieków. Z kolei strona grecka zobowiązała się do wspierania tych badań poprzez dostarczenie stronie polskiej metodyki, opartej na metodzie wyceny warunkowej, która została już wcześniej zastosowana do wykonania podobnych badań w Grecji.

Metoda wyceny warunkowej jest często stosowana do wyceny dóbr środowiskowych. Opiera się ona na badaniach przeprowadzanych wśród potencjalnych konsumentów – użytkowników danego dobra, jakim jest środowisko. W trakcie badania ankietowego zadaje się pytania, ile byliby skłonni zapłacić potencjalni konsumenci za nabycie danego dobra lub ile skłonni byliby przyjąć za rezygnację z możliwości użytkowania tego dobra.

Metodę gotowości do zapłaty (WTP) za poprawę standardu odprowadzania i oczyszczania ścieków zastosowano po raz pierwszy w Polsce w odniesieniu do wybranych gmin w województwie podlaskim. Są to gminy: Zbójna, Dubicze Cerkiewne i Miastkowo. Poprawa tego standardu polegałaby na budowie, w każdej z tych gmin, systemu zbiorowego odprowadzania i oczyszczania ścieków. Budowa i eksploatacja oczyszczalni ścieków komunalnych przyczyniłaby się do poprawy jakości wód powierzchniowych i podziemnych na terenie tych gmin i pozwoliłaby na likwidację zbiorników bezodpływowych i uciążliwego dla środowiska transportu tych ścieków taborem asenizacyjnym. Stworzyłoby to także lepsze warunki dla rozwoju turystyki na terenach badanych gmin.

Kwestionariusz do badań (WTP) został tak zaprojektowany, ażeby ujawnić preferencje i gotowość mieszkańców do zapłaty za korzystanie z oczyszczalni ścieków komunalnych. Ankieta została podzielona na trzy części. Pierwsza część zawierała wstępne pytania,

które pozwoliły na ocenę poziomu wiedzy respondentów z zakresu problematyki gospodarki ściekowej w gminie. Druga część ankiety zawierała pytania o sposoby i problemy związane z usuwaniem ścieków z gospodarstw domowych, o znajomość problemów związanych z zanieczyszczaniem wód na terenie gminy, jak również o zainteresowanie respondentów rozwojem sieci kanalizacyjnej. Respondentom zadano także pytania o koszt odprowadzania ścieków oraz o częstotliwość opróżniania zbiorników bezodpływowych (w przypadku ich posiadania przez respondenta). Trzecia część kwestionariusza dotyczyła danych osobowych i ogólnej charakterystyki socjo-ekonomicznej ankietowanych, obejmującej płeć, wiek, dochód i wykształcenie.

Model, zastosowany do statystycznej analizy wyników badań ankietowych, powstał w programie SPSS, przy użyciu procedur „Analiza-Regresja Binarna-Logistyczna”. Po przeanalizowaniu danych z 250 ankiet okazało się, że 88,4% respondentów zgadza się na wybudowanie oczyszczalni ścieków komunalnych, a 11,6% jest temu przeciwnych.

Z przedstawionego modelu wynika, że osoby, które zgadzają się z budową oczyszczalni ścieków również zgadzają się zapłacić za nią, co jest czymś oczekiwanym.

Ludzie, którzy postrzegają brak wody jako istotny problem, również zgadzają się zapłacić za oczyszczanie ścieków. Wynika to z tego, że brak źródeł wody o dobrej jakości jest związany z czystością wód powierzchniowych, które mogą być zanieczyszczone odprowadzaniem do nich nieoczyszczonych ścieków. Kolejną istotną zmienną jest wiek respondentów. Osoby starsze są gotowe zapłacić, osoby młodsze nie są gotowe. Może to być spowodowane problemami migracyjnymi ze wsi do miast. Młodzież chce przenieść się do większych miast lub zagranicę w celu znalezienia lepszej pracy, a osoby starsze chciałyby mieć rozwiązane problemy oczyszczania ścieków na swoim terenie.

Przedstawiona metoda może być przydatna w procesie podejmowania decyzji w sprawie wybudowania oczyszczalni ścieków komunalnych w każdej z badanych gmin. Wyniki badań pokazują, że prawie 90% mieszkańców zgadza się na wybudowanie oczyszczalni ścieków komunalnych, co oznacza, że projekt ten powinien być wdrożony. Jednakże, o ile większość mieszkańców jest za wybudowaniem oczyszczalni ścieków komunalnych, to nie wszyscy są skłonni do zapłacenia za jej budowę. Wiele osób albo nie stać na zapłacenie, bądź też uważają, że usługi wodociągowo-kanalizacyjne powinny być bezpłatne. Pozostaje sprawą otwartą skąd pozyskać fundusze na budowę oczyszczalni ścieków komunalnych, jeżeli mieszkańców nie będzie stać na pokrycie kosztów ich budowy oraz kosztów późniejszej eksploatacji.

8. Podsumowanie

Głównymi źródłami zanieczyszczeń wód powierzchniowych, które wykorzystywane są po mieszanii z podziemnymi i uzdatnianiu jako woda pitna dla mieszkańców Białegostoku i sąsiednich miejscowości,

są rolnictwo, transport oraz zabiegi melioracyjne. Zabiegi melioracyjne wykonane w ubiegłym wieku wykonane na glebach organicznych dostarczają do wód związków humusowych, a z form z azotu, głównie formę amonową. Skutecznymi metodami które pozwalają na usuwanie jonów amonowych przy użyciu zeolitów naturalnych, którymi naturalne glinokrzemiany. Skuteczność usuwania tych jonów zależy od odczynu wody i twardości wody. Natomiast do oczyszczania wód z ze związków ropopochodnych wykorzystano metody membranowe, to jest ultrafiltrację i nanofiltrację.

Do wyceny dóbr środowiskowych, a w tym dostęp do dobrej jakości wody służy metoda wyceny warunkowej, która była testowana w wybranych gminach województwa podlaskiego. Stwierdzono, że ludzie postrzegają brak wody jako istotny problem. Skłonni są zapłacić za oczyszczanie ścieków a tym samym za poprawę jakości wód, które są źródłem wody pitnej.

Literatura

- Balia D., Dietrich O., Quast J. (2000). Solute retention in a groundwater table controlled fen area with respect to various land use scenarios. *Int. Peat Journal*, 10, 33-47.
- Baralkiewicz D., Siepak J. (1994). The contents and variability TOC, POC and DOC concentration in natural waters. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 4, 15-28.
- Booker N.A., Cooney E.L., Priestley A.J. (1996). Ammonia removal from sewage using natural Australian zeolite. *Water Sci. Technol.*, Vol. 34, 17-24.
- Górnica A., Zieliński P. (1999). Rozpuszczona materia organiczna w wodach rzek północno -wschodniej Polski. W: *Ochrona zasobów i jakości wód powierzchniowych i podziemnych. Wyd. Ekon. i Śród.*, Białystok, 127-132.
- Hansen N.C., Gupta S.C., Moncrief J.F. (2000). Snowmelt runoff, sediment and phosphorus losses under three different tillage systems. *Soil & Tillage Research*, Vol. 57, 93-100.
- Ilnicki P. (2004). Polskie rolnictwo a ochrona środowiska. *Wydawnictwo AR w Poznaniu*.
- Jorgensen S.E., Libor O., Lea Graber K., Barkacs K. (1976). Ammonia removal by use of clinoptilolite. *Water Res.*, 10 213-224.
- Koon J. H., Kaufman W. J. (1975). Ammonia removal from municipal wastewaters by ion exchange. *J. Water. Pollut. Control Fed.*, 47,448-465.
- Leszczyński J. (2009). Removal of ammonium ions from water by means of ion-exchange using natural aluminosilicate. *Polish Journal of Environmental Studies – Series of Monographs*, Vol 2, 38-42.
- Pawlaczyk P., Wolejko L., Jermaczek A., Stańko R. (2002). Poradnik ochrony mokradeł. *Wyd. Lubuski Klub Przyrodn.*, 61-64.
- Pulikowski K. (2004). Zanieczyszczenia obszarowe w małych zlewniach rolniczych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Rozpr. CCXI*, 479: 137.
- Pulikowski K., Kostrzewa S., Paluch J., Paruch A. (2001). Odpływ zanieczyszczeń z mikrozelewni rolniczej położonej na przedgórzu sudeckim. *Zesz. Prób. Post. Nauk. Roi.* z. 475: 489-496.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 lutego 2004 roku w sprawie klasyfikacji dla prezentowania stanu wód powierzchniowych i podziemnych, sposobu prowadzenia monitoringu oraz sposobu interpretacji wyników

i prezentacji stanu tych wód. (Dz. U. z 2004 Nr 32, poz. 284).

Rutkowski M. (2001). Opracowanie wielofunkcyjnego środka koagulacyjno-adsorpcyjnego do detoksyfikacji i odmetalizowania ścieków. *Raport z realizacji projektu badawczego* nr 6 P04G 088 14, Wrocław.

Staniszewski R., Szoszkiewicz J., Tomoń M. (2004). The role of selected plants in limitation of freshwater trophy with emphasis on *Sahinia natans* (L.). *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 13, 67-69.

Wanga Y., Kmiyaa Y., Okuharaa T. (2007). Removal of low-concentration ammonia in water by ion-exchange using n-mordenite water. *Research*, 41, 269 - 276.

Wanga Y., Shijun L., Ze X., Tianwei H., Sun C., Tan Z. (2006). Ammonia removal from leachate solution using natural Chinese clinoptilolite. *Journal of Hazardous Materials*, B136, 735-740.

Zabiegała B. (2004). Oznaczanie zawartości węgla całkowitego, całkowitego węgla organicznego oraz węgla

nieorganicznego w próbkach środowiskowych z kułometrycznym oznaczaniem końcowym, www.pg.gda.pl/chem.

SOURCES OF SURFACE WATER POLLUTION AND SOME METHODS THEIR TREATMENT

Abstract: The aim of this study was to identify sources of pollution of surface water and some pollutant removal methods. Surface waters are contaminated by substances migrating from the soil and by surface flow and subsurface flow. There are other sources such as transport, land melioration, etc. One of the method of ammonium ion removal from the water is ion-exchange method using basaltic rock-mantle. However oil-related compounds can be effectively removed by ultrafiltration.

ZABEZPIECZENIE GŁĘBOKIEGO WYKOPU WEWNĄTRZ HALI STULECIA WE WROCŁAWIU

Jarosław KRAŻELEWSKI^a, Olgierd PUŁA^{b*}

^a KELLER Polska sp. z o.o., ul. Poznańska 172, 5-850 Ożarów Mazowiecki

^b Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, pl. Grunwaldzki 1, 50-377 Wrocław

Streszczenie: Hala Stulecia jest konstrukcją wpisaną na Listę Światowego Dziedzictwa Kulturalnego i Przyrodniczego UNESCO jako pionierskie osiągnięcie inżynierii i architektury XX wieku. Głównym zadaniem ostatniej modernizacji Hali Stulecia było pogłębienie podłogi w centralnej części areny widowiskowej do $-4,80$ m w celu realizacji ruchomej podłogi osadzonej na siłownikach hydraulicznych. Poziom wody gruntowej ustalono na $2,5$ m poniżej poziomu podłogi. Grunt spoisty został zlokalizowany na głębokości 14 m poniżej podłogi. Ścianki szczelne musiały być zagłębione na około 15 m, a ograniczenia wysokości wynosiły 12 m. Zarekomendowano Kolumny DSM i *Jet Grouting* jako spełniające wymagania Generalnego Wykonawcy: krótki czas wykonania konstrukcji i zapewnienie maksymalnego uszczelnienia przy przejściu przez glinę zwalową oraz niski koszt wdrożenia.

Słowa kluczowe: kolumny DSM, kolumny *Jet Grouting*, głębokie wykopy, Hala Stulecia.

1. Wstęp

Halę Stulecia we Wrocławiu budowano w latach 1911 – 1913 według projektu Maksa Berga. Obiekt usytuowany jest na obrzeżach Parku Szczytnickiego i w sąsiedztwie Ogrodu Zoologicznego w północno-wschodniej części Wrocławia. Maks Berg projektując Halę skoncentrował się na wymaganiach funkcjonalnych i kształtowaniu wnętrza w harmonii z systemem konstrukcyjnym, co nadało całości formę modernistycznej budowli monumentalnej, uważanej za jedno z najbardziej znaczących dzieł architektury XX wieku. Układ Hali jest w rzucie kolisty (Ilkosz, 2005), oparty symetrycznie na planie greckiego krzyża, na którego trzech końcach znajdują się małe hale wyjściowe, a na zachodnim, skierowanym w stronę centrum miasta – dwupoziomowa owalna hala wejściowa. Konstrukcyjnie Hala złożona jest z dwóch niezależnych elementów – podstawy w formie walca, w którym wycięte są cztery arkady w kształcie łuków wygiętych w płaszczyźnie podłużnej o wymiarach 41 m u podstawy i wysokości $16,7$ m. Grubość ścian walca zmienia się od 5 m (w poziomie fundamentów) do 2 m na wysokości łożysk, na których spoczywa kopuła. Drugi element stanowi tak zwana kopuła, która jest oddylatowana i spoczywająca swobodnie (32 walcowe łożyska dla każdego łuku), będąca jednak w istocie układem schodzących się promieniście żelbetowych łuków – żeber, opierających się u góry o centralny

pierścień ściskany, a u dołu o pierścień rozciągany, wzmocniony stalową wkładką. Żebrowa kopuła (Hala Stulecia o wysokości 23 m i rozpiętości 65 m, była w chwili wzniesienia budynku największą żelbetową kopułą na świecie Czarniecki i Czerek, 2013). Wymiary kopuły były większe niż kopuły Hagia Sofia w Istambule i Panteonu w Rzymie.

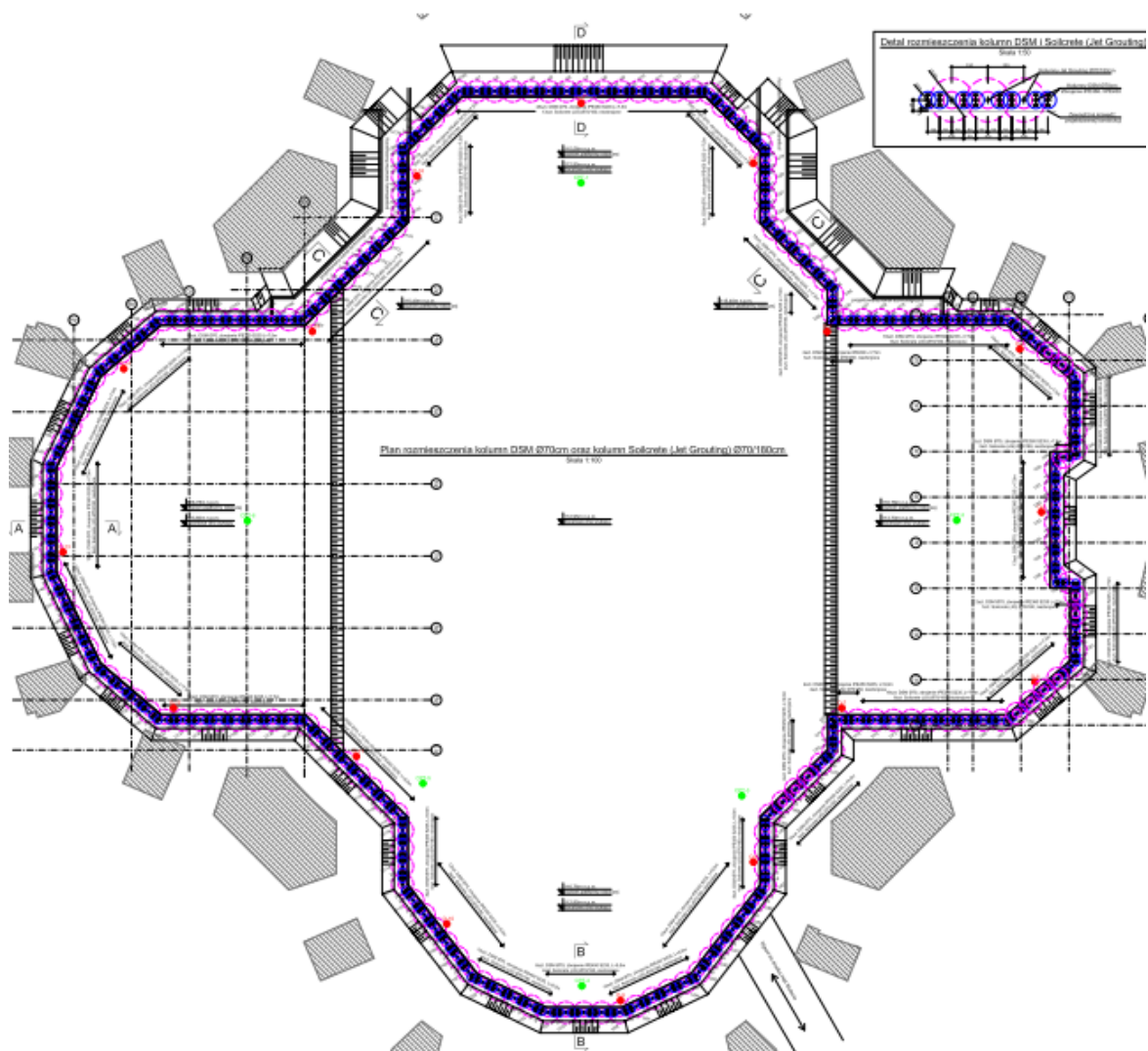
Cała Hala ma 42 m wysokości – maksymalna szerokość wnętrza Hali wynosi 95 metrów, a dostępna powierzchnia $14,0$ tys. m^2 . Na rysunku 1 przedstawiono widok Hali Stulecia po wybudowaniu, a na rysunku 2 rzut przyziemia Hali. Prócz centralnej hali, w budynku zaplanowano jeszcze 56 innych pomieszczeń wystawienniczych i obszerne kuluary okrążające główną salę. Całkowita powierzchnia obliczona była na 10 tysięcy osób. Na kopule ustawiona jest latarnia o średnicy zewnętrznej $17,4$ m i wysokości $5,75$ m. Jej konstrukcję nośną stanowią cztery tarczownicowe ramy o słupach dwugałęziowych, rozmieszczone promieniście i ustawione w ściskanym pierścieniu kopuły na wysokości 36 m od poziomu posadzki. Główne żebra konstrukcji oparte są na czterech stopach fundamentowych.

W 2006 roku wpisano Halę Stulecia na Listę Światowego Dziedzictwa Kulturalnego i Przyrodniczego UNESCO jako pionierskie osiągnięcie inżynierii i architektury XX wieku.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: olgierd.pula@pwr.wroc.pl



Rys. 1. Widok Hali Stulecia po wybudowaniu



Rys. 2. Rzut przyziemia Hali Stulecia

Celem pracy było przedstawienie dwóch wariantów zabezpieczenia głębokiego wykopu wewnątrz Hali Stulecia, ze wskazaniem ich wad i zalet.

2. Zakres remontu

Przez sto lat użytkowania Hali wykonano kilka modernizacji, które zmieniały wystrój wnętrza (w tym walory akustyczne), konstrukcję i lokalizację trybun, a także funkcję wielu pomieszczeń. Obecny remont części zewnętrznej przewidywał wymianę stolarki okiennej (Czarniecki i Czerek, 2013), naprawę konstrukcji ścian zewnętrznych oraz elewacji. Projekt remontu wnętrza Hali zakładał zwiększenie ilości miejsc siedzących z 7 do 10 tysięcy. Taka ilość miejsc siedzących umożliwiłaby organizację masowych imprez sportowych, koncertów, wystaw czy spektakli artystycznych. W trakcie rozpoczętego w styczniu 2011 roku remontu wnętrza zdemontowano istniejące żelbetowe trybuny, posadzkę głównej sali widowiskowej oraz część ścian działowych w kularach, likwidując pomieszczenia biurowe. Wszystkie te prace miały na celu przywrócenie pierwotnych założeń projektu z 1911 roku. Głównym zadaniem było przegłębienie posadzki sali widowiskowej do poziomu -3,70 m, w celu umożliwienia wykonania ruchomej podłogi (zapadni). W wykonanym zagłębieniu zaplanowano dodatkowe trybuny lub widownie i boisko sportowe.

3. Warunki gruntowe i warunki wodne

Dla potrzeb prac projektowych wykorzystano dane o podłożu gruntowym (Puła, 2011) dostępne w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej wykonywanej na potrzeby przebudowy pawilonu restauracyjnego oraz wielopoziomowego parkingu zlokalizowanych w sąsiedztwie Hali. Dodatkowo, wykonano jeden odwiert wewnątrz Hali oraz dwa na zewnątrz (do głębokości 15 m), których zadaniem było potwierdzenie ciągłości warstw podłoża oraz ustalenie poziomu wody gruntowej. Ustalono, że wewnątrz hali pod konstrukcją posadzki zalega warstwa zagęszczonej pospółki którą podścielają piaski średnie i grube w stanie średnio zagęszczonym i zagęszczonym. Miąższość warstwy piasków zbadano za pomocą dwóch otworów usytuowanych na zewnątrz Hali. Strop gruntów spoistych – gliny morenowej w stanie twardo plastycznym o $I_L = 0,10$ stwierdzono na głębokości 13,2 - 13,4 m poniżej poziomu terenu, czyli na rzędnej około 104,90 m. Na stropie gruntów spoistych (morena denna lodowca) zalega tak zwany bruk morenowy, czyli kamienie i głazy o różnej średnicy, pozostawione przez topniejący lodowiec. Swobodne zwierciadło wody gruntowej stwierdzono na głębokości 2,3 - 2,5 m, czyli na rzędnej 114,94 m. Poziom zwierciadła wody w gruncie jest ściśle powiązany z wahaniami wody w rzece Odrze, przepływającej około 500 m od terenu inwestycji. W okresach zwiększonych opadów i podniesienia się poziomu wody w rzece poziom wody w gruncie może się podnosić.

4. Realizacja obudowy wykopu

4.1. Rozwiązanie projektowe

W centralnej części sali widowiskowej zaplanowano przegłębienie w celu zainstalowania w nim podłogi ruchomej na siłownikach hydraulicznych. Obniżenie posadzki w tym rejonie będzie wynosiło 3,50 m poniżej dotychczasowego poziomu (poziom odniesienia 117,80 m n.p.m.). Na całej powierzchni przegłębienia została zaprojektowana płyta fundamentowa. Grubość płyty w części centralnej oraz w absydach północnej i południowej wyniesie 100 cm, a w absydach wschodniej i zachodniej – 60 cm. Poniżej poziomu posadowienia płyty należy ułożyć warstwę betonu podkładowego oraz izolację ciężką, co powoduje, że dno wykopu osiągnie rzędną 112,90 m n.p.m., czyli 5,09 m poniżej dotychczasowego poziomu posadzki. Niezbędne jest zastosowanie izolacji ciężkiej (typu Grace), ponieważ poziom wody wokół powstałej kondygnacji będzie się utrzymywał na wysokości około 2,5 m powyżej poziomu posadowienia. Lokalnie, w miejscach zbiorników i szybów windowych dno wykopu osiągnęło głębokość 5,90 m poniżej poziomu odniesienia (rzędna 111,90 m n.p.m.). Realizacja planowanego programu modernizacji wymaga wykonania wokół wykopu ścianki szczelnej przeciwdziałającej napływowi wody gruntowej do wnętrza wykopu. Ścianka powinna być zagłębiona poniżej stropu gruntów spoistych, czyli na głębokość około 13,7 - 14,0 m. Planowany zakres przegłębienia spowoduje częściowe odsłonięcie czterech stóp fundamentowych podtrzymujących konstrukcję łuków żelbetowych, stanowiących główny element konstrukcyjny Hali oraz ośmiu małych stóp, na których opierają się żelbetowe słupy konstrukcji wewnętrznych. Fundamenty te wymagają również zabezpieczeń uniemożliwiających ich osiadanie (w wyniku obniżania zwierciadła wody gruntowej, jak i realizacji prac ziemnych). W projekcie przyjęto, że wzmocnienie zostanie wykonane przy pomocy kolumn *Jet Grouting* lub mikropali. W projekcie wykonawczym zaproponowano zastosowanie stalowej ścianki szczelnej wprowadzanej w grunt techniką wciskania. Etapowanie prac powinno przebiegać w następujący sposób:

- wykonanie wykopu szerokoprzestrzennego na głębokość od 1,5 do 2,6 m poniżej poziomu obecnej posadzki Hali, z pozostawieniem poziomej półki o szerokości 0,5 m od zewnętrznego lica ścianki;
- pozostawienie półki wokół wykopu spowoduje że powstaną skarpy o pochyleniu: 1:1 w okolicach dużych stóp fundamentowych podtrzymujących konstrukcję Hali i 1:1,5 na pozostałym obszarze;
- wciskanie ścianki stalowej na obwodzie wykopu (z obniżonego poziomu) na głębokość około 13,7 - 14,0 m;
- w rejonie dużych stóp fundamentowych oraz klatki schodowej zaplanowano w obrębie absydy wschodniej i zachodniej dodatkowe wzmocnienie obudowy wykopu przez zastosowanie kotew iniekcyjnych o łącznej długości 16,5 m; buławy kotew o długości

6,0 m umieszczone zostały w warstwie pospółtek (poniżej głębokości 6,8 m).

Zaproponowana w projekcie ścianka szczelna stalowa ma szereg wad ograniczających jej przydatność w warunkach budowy ze względu na wysokość istniejącej konstrukcji nad posadzką Hali). Generalny Wykonawca nie mógł sobie też pozwolić na długi czas realizacji.

Pomimo zaplanowania 2,5 m głębokości wykopu szerokoprzestrzennego, grodzice i tak powinny mieć na znacznej części obwodu wykopu długość około 11 m. W rejonie absyd, gdzie planowano skarpowanie na głębokości 1,5 m grodzice powinny mieć długość około 12 m. Mimo stosowania techniki wciskania grodzic (wvibrowywanie nie jest możliwe ze względu na konstrukcję obiektu), co najmniej 4 - 6 pierwszych grodzic należy wvibrować. W tym miejscu musi stanąć dźwig, na którego ramieniu musi zawisnąć wibrator o wysokości około 3 m, czyli potrzebna jest przestrzeń nad wykopem na wysokości ponad 20 m. Równocześnie mogłyby pracować tylko urządzenia jednego typu. Duża liczba załamań na trasie ścianki bardzo komplikowałoby wykonawstwo, co wydłuża czas realizacji obudowy. Grodzice trudno jest wprowadzić przez bruk morenowy w głąb warstwy gliny bez ich lokalnych uszkodzeń, czyli tworzą się „okna” w dole części ścianki szczelnej, które trzeba „zamykać” przez zastosowanie iniekcji.

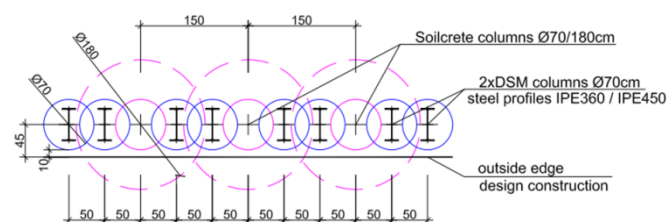
4.2. Rozwiązanie zamiennie

Przy istniejących odległościach między obudową a fundamentami żelbetowej konstrukcji nośnej Hali obudowa powinna być sztywna. W związku z tym,

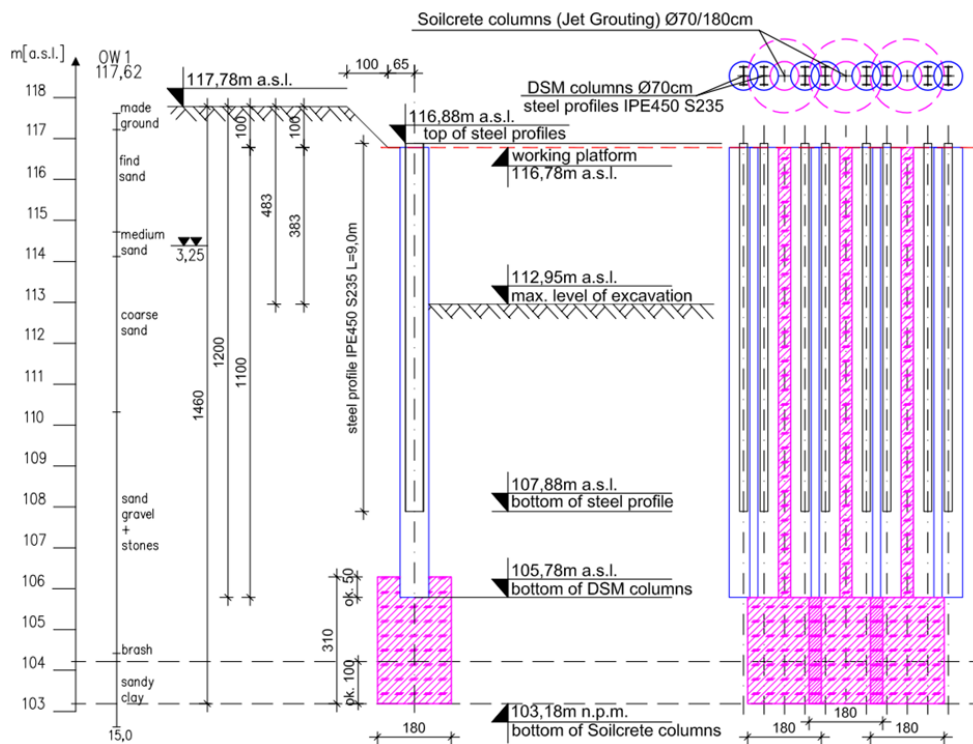
Autorzy artykułu wraz z firmą Keller Polska Sp. z o.o. (Keller, 2011; Sosnal i Krążelewski, 2011) zaproponowali zamienne rozwiązanie zabezpieczenia głębokiego wykopu oraz przegrodę przeciwnfiltracyjną wykonywaną w technologii kolumn DSM oraz kolumn *Soilcrete* (*Jet Grouting*). Zaproponowane rozwiązanie uwzględniało trzy główne wymagania Generalnego Wykonawcy: krótki czas realizacji zadania, wykonanie przegrody przeciwnfiltracyjnej zapewniającej maksymalne uszczelnienie przy przejściu przez bruk morenowy oraz niski koszt realizacji zadania. Powyższe wymagania zostały spełnione poprzez wykonanie przegrody przeciwnfiltracyjnej w dwóch etapach:

- etap I: polegał na wykonaniu kolumn DSM $\varnothing 70$ cm i długości 11,0 m (wysokość maszyny pracującej do 12,0 m) zbrojonych kształtownikiem IPE 450;
- etap II: polegał na wykonaniu kolumn *Soilcrete* $\varnothing 70$ cm/180cm, których zadaniem było uszczelnienie przejścia przez bruk morenowy przy jednoczesnym uszczelnieniu przestrzeni pomiędzy kolumnami DSM.

Na rysunku 3 pokazano przekrój przez projektowaną obudowę głębokiego wykopu, a na rysunku 4 – rzut zabezpieczenia i przegrody przeciwnfiltracyjnej.



Rys. 4. Rzut zabezpieczenia głębokiego wykopu i przegrody przeciwnfiltracyjnej

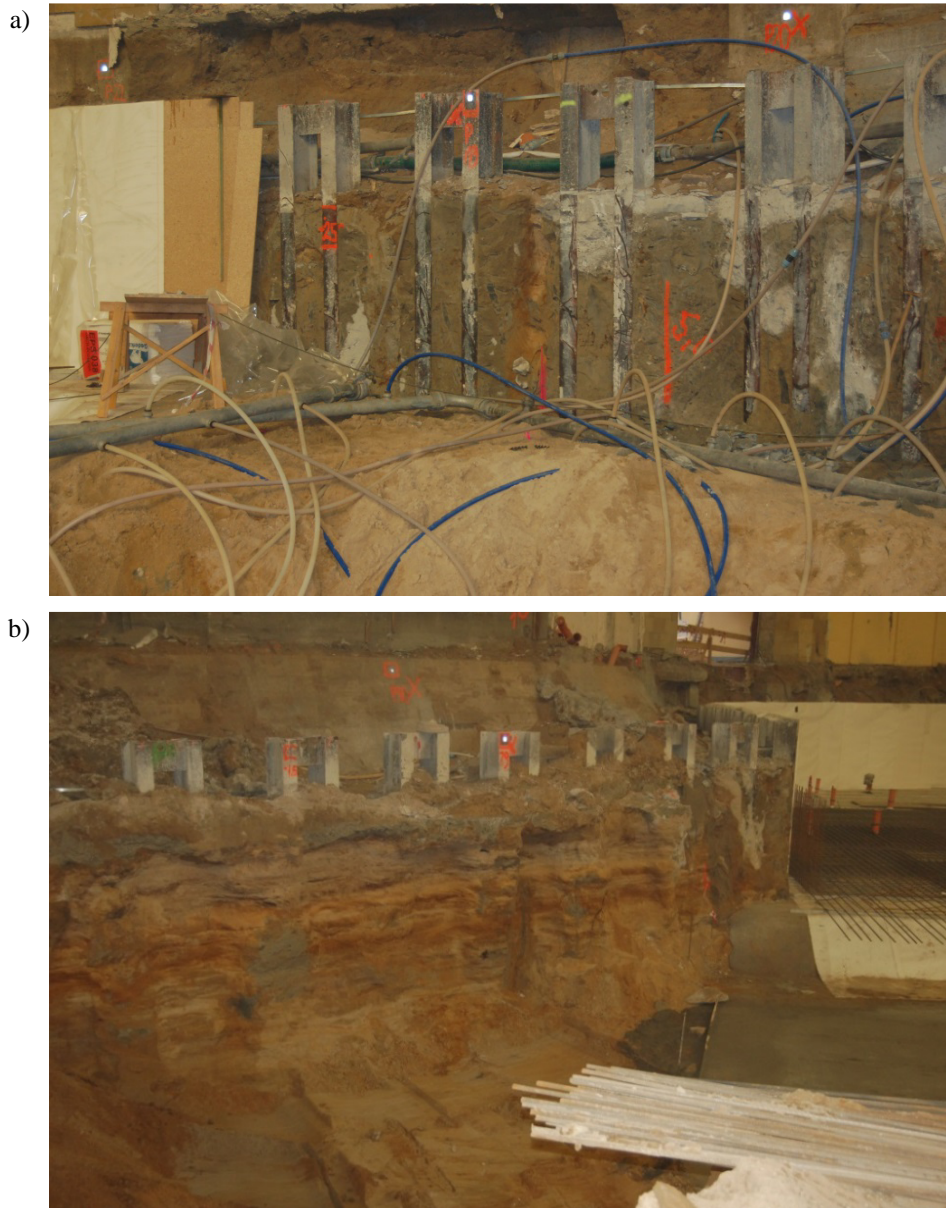


Rys. 3. Przekrój przez obudowę głębokiego wykopu

Technologia DSM polega na wykorzystaniu gruntu rodzimego przy wzmocnianiu podłoża. Istotą tej technologii jest wymieszanie gruntu z zaczynem cementowym przy pomocy specjalnego typu wiertnicy (Topolnicki, 2004 i 2011). Kilkakrotne wkręcenie i wyciągnięcie ślimaka z gruntu powoduje homogenizację materiału gruntowego z zaczynem cementowym i utworzenie w podłożu kolumny cemento-gruntowej o dużej wytrzymałości. Wytrzymałość cemento-gruntu po 28 dniach dojrzewania powinna wynosić 3,5 MPa.

Na podstawie obliczeń przyjęto, że zabezpieczeniem wykopu będzie palisada z kolumn DSM o średnicy 70 cm, wspornikowo zamocowana w gruncie. Przeniesienie sił poziomych pochodzących od parcia gruntu jest możliwe po wprowadzeniu w świeży cemento-grunt kształtowników stalowych IPE360 oraz IPE450 ze stali S235 (Rys. 5a). Na rysunku 5b pokazano odkopane kolumny DSM z widoczną instalacją odwadniającą.

Technologia *Jet Grouting* również wykorzystuje grunt rodzimy w miejscu wykonania kolumny. W pierwszej fazie realizacji kolumny żerdź wprowadzona w grunt silnym strumieniem wody niszczy strukturę gruntu obracając się wokół własnej osi. Przy wycofywaniu żerdzi, ku górze w podłożu wprowadzony zostaje zaczyn cementowy pod dużym ciśnieniem. Powstaje cemento-grunt o dużej wytrzymałości. Średnica takiej kolumny zależy od zastosowanego ciśnienia. Zbrojenie kolumny DSM dwuteownikami zaprojektowano do głębokości 7,5 m poniżej rzędnej 115,50 m n.p.m. Strop warstwy nieprzepuszczalnej, w której ścianka powinna być zagłębiona na 1 m, znajduje się na głębokości około 11 m (rzędna 104,60 m). Do tej głębokości wykonano kolumny DSM a ostatni metr (w warstwie gruntu spoistego) wykonano jako kolumny *Jet Grouting* o średnicy 1,80 m. Na długości ścianki układ kolumn był następujący: dwie kolumny DSM i jedna kolumna *Jet Grouting*. Istotną



Rys. 5. Widok kolumn DSM zbrojonych dwoma dwuteownikami IPE450 stal S235: a) widok przed odkopaniem, b) odsłonięte kolumny DSM z widoczną instalacją odwadniającą



Rys. 6. Ułożona izolacja na ścianie zabezpieczającej, układane jest zbrojenie płyty fundamentowej

zaletą zastosowanych technologii było to, że już po 14 dniach od daty wykonania odcinka ścianki można było usunąć grunt z wnętrza wykopu, pozostawiając jedynie 5 metrowy pas przy ścianie. Po 21 dniach można było usunąć pozostały pas gruntu w wykopie. Taka gwarancja wykonawcy pozwoliła na szybsze prowadzenie prac ziemnych w wykopie. Na rysunku 6 pokazano wykonanie płyty fundamentowej.

5. Wnioski końcowe

W wyniku prowadzonej analizy dostarczonych dokumentów i wyników wizji lokalnej można stwierdzić, że:

- zastosowana metoda zabezpieczenia ścian głębokiego wykopu wewnątrz hali spełniła swoje zadanie, ponieważ nie stwierdzono za pomocą pomiarów geodezyjnych oddziaływania wiertnic i maszyn budowlanych pracujących w wykopie na konstrukcję hali;
- obudowa została wykonana w czasie o miesiąc krótszym niż planowana realizacja stalowej ścianki szczelnej;
- obniżenie poziomu zwierciadła wody gruntowej wewnątrz wykopu w celu wykonania płyty fundamentowej nie spowodowało obniżenia zwierciadła wody gruntowej poza przegłębieniem.

Literatura

- Czarniecki M., Czerek D. (2013). Remont Hali Stulecia. *Inżynier Budownictwa*, 02/2013, 84-90.
- Ilkosz J. (2005). Hala Stulecia i Tereny Wystawowe we Wrocławiu – dzieło Maksy Berga. *Muzeum Narodowe we Wrocławiu*, Wrocław, 336.

KELLER (2011). Projekt wykonawczy zabezpieczenia głębokiego wykopu w Hali Stulecia.

Pała O. (2011). Opinia geotechniczna dotycząca sposobu zabezpieczenia głębokiego wykopu wewnątrz Hali Stulecia we Wrocławiu. Wrocław 2011.

Sosnal R., Krążelewski J., (2011). Deep excavation support using DSM and Soilcrete columns in Centennial Hall - The working project. Wrocław, 2011.

Topolnicki M. (2004). In situ Soil Mixing. Ground Improvement. Moseley M., Kirsch K. (red.), *Spon Press*, London, 331-428.

Topolnicki M. (2011). Underpinning and lifting of civil engineering structures using controlled grouting processes. *Materiały konferencyjne XXV Konferencji Naukowo Technicznej „Awary budowlane”*, Międzyzdroje, 2011, 175-200.

DEEP EXCAVATION SUPPORT SYSTEM INSIDE THE CENTENNIAL HALL IN WROCLAW

Abstract: The Centennial Hall (Hala Stulecia) is a structure which was included in the cultural and natural heritage of UNESCO as a pioneer achievement of the 20th-century engineering and architecture. The main task of the last modernization of the Centennial Hall was deepening the flooring in the central part of the entertainment arena to -4.80 m in order to implement a moving floor supported on hydraulic cylinders. The groundwater level was about 2.5 m below the flooring. Cohesive soil was located at the depth of 14 m below the flooring. Cut off wall was necessary to be positioned to the depth of about 15 m, and height limitations were 12 m. DSM and Jet Grouting columns were recommended to meet the General Contractor requirements: short task execution, construction of a cut-off wall ensuring the maximum sealing at the passage through the boulder clay layer, and low-cost implementation.

ZAGOSPODAROWANIE ENERGII WIATRU PRZY UŻYCIU MAŁYCH TURBIN WIATROWYCH O PIONOWEJ OSI OBROTU

Anna OSTROWSKA-BUĆKO*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W opracowaniu dokonano charakterystyki energii wiatru i sposobu jej przetwarzania w energię elektryczną. Zaprezentowano dwa rozwiązania konstrukcji turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu i o poziomej osi obrotu uwzględniając ich wady i zalety. Ponadto przeanalizowano warunki klimatyczne w Polsce pod kątem zasobów wiatru i lokalizacji turbin wiatrowych. W opracowaniu wskazano turbiny o pionowej osi obrotu jako rozwiązania pozwalające na szersze i lepsze wykorzystanie zasobów wiatrów w Polsce. Pozyskiwana w ten sposób energia wspomaga istniejące indywidualne instalacje grzewcze bądź oświetleniowe i poprawia lokalne bezpieczeństwo energetyczne.

Słowa kluczowe: energia wiatru, turbina wiatrowa.

1. Wprowadzenie

Pojawiające się w ostatnich latach w Europie Wschodniej konflikty dotyczące dostaw gazu ziemnego dotyczą istotnego problemu zagrożenia bezpieczeństwa energetycznego tych krajów, których gospodarka opiera się na konwencjonalnych źródłach energii. Współczesna energetyka bazuje na eksploatacji zasobów surowców kopalnianych, takich jak: węgiel kamienny, ropa naftowa czy gaz ziemny. Surowce te charakteryzują się ograniczeniem zasobów i uzależniają wiele państw od potentatów rynku paliwowego. W związku z tym, pojawia się potrzeba dywersyfikacji i zastępowania tych źródeł, przede wszystkim poprzez szersze wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych. Odnawialne źródła energii (OZE) stają się coraz atrakcyjniejszą alternatywą ze względu na swój niewyczerpalny, bo ciągle odnawialny potencjał, przystępność oraz obecność bardziej zaawansowanych technicznie urządzeń pozwalających na jej coraz efektywniejsze pozyskiwanie i przetwarzanie. OZE ze względu na szereg swych zalet i zmniejszoną emisję zanieczyszczeń są niewątpliwie cennym i pożądanym źródłem energii sprzyjającym uniezależnieniu gospodarki światowej od konwencjonalnych źródeł energii.

W polityce energetycznej Polski istotne znaczenie ze względu na dostępność i potencjał do wykorzystania ma energia wiatru. Technologia pozyskiwania tej energii w ostatnich latach rozwija się bardzo intensywnie. Dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej i opłacalność związanych z nią inwestycji sprawia, że staje się ona interesującym sposobem rozwiązania problemów energetycznych obszarów pozbawionych tradycyjnych

źródeł energii i jednocześnie nabiera niebagatelного znaczenia w energetyce.

Współczesna, zaawansowana technika przetwarzania energii wiatru w elektryczną energię użytkową koncentruje się na instalowaniu coraz większych zespołów turbin wiatrowych o wale poziomym. Potężne konstrukcje wieżowe dochodzą do wysokości nawet 100 metrów, przez co zakłócają naturalny pejzaż Ziemi i są źródłem uciążliwego hałasu. Obiekty takie nastroją poważnych trudności, które są nie do przewyżczenia w warunkach klimatycznych Polski. W dużych elektrowniach produkcja energii zależy od silnych wiatrów – powyżej 5 m/s.

Na obszarze Polski wiatry o takiej prędkości i wyższe występują zaledwie przez 20% dni i tylko w wąskim pasie terenów nadmorskich (Lebiedowski, 2008). Na pozostałym obszarze przeważają wiatry słabe i bardzo słabe o prędkości 2-5 m/s. Rozwiązaniem konstrukcyjnym dającym obiecujące wyniki generowania mocy już przy średniorocznych prędkościach wiatru powyżej 2 m/s są rotory wiatrowe o pionowej osi obrotu.

Uzasadnione są zatem rozważania i poszukiwanie rozwiązań najbardziej efektywnego zagospodarowania energii wiatrowej w warunkach klimatycznych Polski.

2. Charakterystyka energii wiatru

Energia wiatru jest przekształconą formą energii słonecznej. Zjawisko wietrzności atmosfery (wiatru) jest powodowane ruchem mas powietrza generowanym nierównomiernym rozkładem ciśnienia atmosferycznego nad powierzchnią Ziemi.

Różnica potencjałów w atmosferze wynika z kulistego kształtu Ziemi i nierównomiernego ogrzewania

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: ana.ostrowska@o2.pl

jej powierzchni przez promieniowanie słoneczne. Na kierunek przemieszczania się mas powietrza wpływ ma również różnica temperatury między lądem a oceanem, ruch wirowy Ziemi i zjawisko szybszego nagrzewania i schładzania lądu w porównaniu do powierzchni wód.

Szacuje się, że do powierzchni Ziemi dociera około 1-2 % energii słonecznej ulegającej przekształceniu w energię kinetyczną wiatru, której jest około 2700 TW. (Lewandowski, 2010).

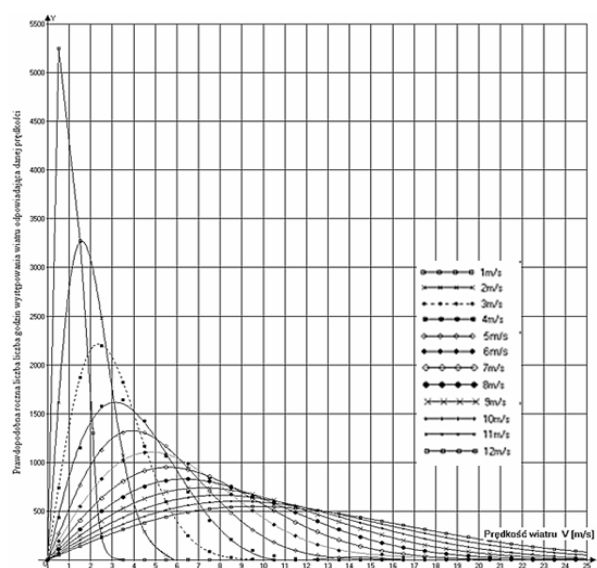
Światowy potencjał energetyczny wiatrów pod względem możliwości zainstalowania siłowni wiatrowych szacuje się na poziomie 40 TW nad powierzchnią lądów i 20 TW nad otwartym morzem (Gumułka i in., 2006).

2.1. Moc wiatru

Zjawisko wiatru można opisać za pomocą szeregu parametrów: takich jak prędkość wiatru wraz z przypisaną mu odpowiednią skalą, gęstość powietrza i ciśnienie atmosferyczne. W zagadnieniach wykorzystania wiatru w energetyce za pomocą urządzeń przetwarzających energię kinetyczną powietrza na energię mechaniczną znaczenie ma prędkość oraz jej rozkład przestrzenny i czasowy.

Opłacalność inwestycji w energetykę wiatrową jest silnie uzależniona od prędkości średniorocznych wiatru i częstotliwości jego występowania.

Prędkość wiatru jest wielkością zmieniającą się w sposób stochastyczny i można ją opisywać jedynie w sposób statystyczny. Podstawowym parametrem charakteryzującym wielkość zmieniającą się w sposób losowy jest jej wartość średnia w czasie. Średnioroczne prędkości wiatru dla danego obszaru, będące efektem wieloletnich pomiarów, są przedstawiane dla danego terenu w postaci map (Lewandowski, 2010). Zmienność prędkości wiatru jest z dobrym przybliżeniem opisywana przez rozkład Weibulla (rys. 1).



Rys. 1. Rozkład Weibulla. Charakterystyka lokalnych prędkości wiatru (zasobów energii) w zależności od prędkości średniorocznych. (Gumułka i Wodniak, 2008)

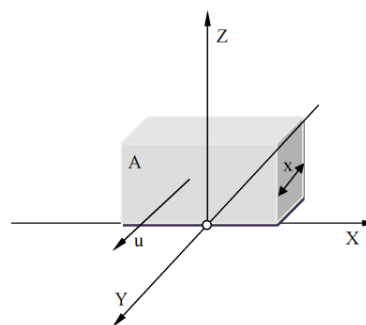
W oparciu o taki rozkład określa się charakterystykę lokalnych zasobów wiatru. Rozkład Weibulla w postaci zbioru charakterystyk przedstawia zależność przewidywanej liczby godzin wiania wiatru z określoną prędkością. (Gumułka i Wodniak, 2008).

Prędkość wiatru, przy określonej gęstości powietrza, pozwala określić energię kinetyczną strumienia wiatru napływającego na wirnik elektrowni. Z kolei znajomość energii kinetycznej umożliwia określenie mocy strugi wiatru (www.baza-oze.pl).

Energję kinetyczną masy powietrza m (rys. 2) poruszającej się z prędkością u w kierunku x można wyrazić zależnością (Johnson, 1985):

$$U = \frac{1}{2} \rho A u^3 = \frac{1}{2} (\rho A x)^2 \quad (1)$$

gdzie: A jest przekrojem powierzchni czołowej strumienia powietrza w m^2 , ρ jest gęstością powietrza w kg/m^3 , x jest szerokością strumienia powietrza w m , a u to prędkość strumienia powietrza w m/s .



Rys. 2. Objętość powietrza o powierzchni natarcia A poruszająca się z prędkością u (Johnson, 1985)

Wówczas moc wiatru można wyrazić jako różniczkowy wzrost energii kinetycznej względem czasu:

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad [W] \quad (2)$$

Strumień energii wiatru można wyrazić następująco (Chmielniak, 2004):

$$E_w = \frac{1}{2} \rho A \int_0^T u^3 dt \quad [J/m] \quad (3)$$

gdzie T jest okresem czasu w którym wyznacza się energję, wyrażonym w h .

Dla energetyki wiatrowej obliczenia przeprowadza się dla temperatury $15^\circ C$ i ciśnienia 1013 hPa , przy których $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$. Przyjmując jednostkową powierzchnię natarcia $A = 1,0 \text{ m}^2$ otrzymuje się moc zawartą w wietrze w funkcji jego prędkości (Michalak, 2009):

$$P_w = 0,6125 u^3 \quad [W/m^2] \quad (4)$$

Z powyższych zależności wynika, że prędkość wiatru występuje w trzeciej potędze i determinuje wartość mocy jaką możemy z niego uzyskać. W związku z tym,

podwojenie wartości prędkości wiatru prowadzi do ośmiokrotnego zwiększenia energii w nim zawartej.

Punktem wyjścia w przypadku wykorzystania energii wiatru jest jego średnioroczna prędkość, która decyduje o opłacalności inwestycji pod względem ekonomicznym. W warunkach Polski (Soliński, 1999) przyjmuje się, że prędkość > 4 m/s kwalifikuje dany obszar jako korzystny dla energetyki wiatrowej. Prędkość średnia nie jest jednak jedynym czynnikiem decydującym o przydatności danego miejsca na inwestycję aeroenergetyczną. Rozkład prędkości wiatru może mieć różne kształty przy takiej samej średniorocznej prędkości wiatru. Istotne są udziały prędkości o niskich i wysokich wartościach (Michalak, 2009). Podczas planów lokalizacji turbiny wiatrowej bardzo ważne jest określenie wpływu właściwości terenu, na którym wiatry występują i zmiany szybkości wiatru w zależności od wysokości występowania jego strumienia. Średnia prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością nad powierzchnią ziemi. Korzystne jest zatem usytuowanie turbin na wysokich wierzchołkach, gdyż na większych wysokościach są lepsze warunki wiatrowe.

Do opisu rozkładu prędkości wiatru w funkcji wysokości i wpływu właściwości terenu na jego rozkład służy zależność logarymiczna (Flaga, 2008):

$$\frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \frac{\ln(z_2) - \ln(z_0)}{\ln(z_1) - \ln(z_0)} \quad [\text{m/s}] \quad (5a)$$

gdzie: $u(z_1)$ i $u(z_2)$ oznaczają odpowiednio prędkości wiatru na wysokościach z_1 i z_2 , natomiast z_0 oznacza szorstkość terenu.

lub zależność wykładnicza:

$$\frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad [\text{m/s}] \quad (5b)$$

gdzie α jest wykładnikiem zależny od szorstkości i czasu uśredniania pomiarów prędkości wiatru.

Z obu wyżej przedstawionych zależności wynika, że na pionowy profil wiatru największy wpływ ma szorstkość terenu. Przez szorstkość terenu rozumie się różnorodność jego powierzchni będącej wynikiem znajdujących się w strefie przemieszczania wiatru przeszkód. Powierzchnia bardzo szorstka hamuje przepływ wiatru i powoduje silne zawirowania. Wielkość ta wpływa w istotnym stopniu na ocenę opłacalności inwestycji.

Fakt, że prędkość wiatru wzrasta znacząco wraz z wysokością, przekłada się na wysokość nowoczesnych elektrowni wiatrowych, które osiągają wysokość od 60 m do 160 m. Według Radziejewicza usytuowanie gondoli turbozespołu wiatrowego na wysokości 160 m nad poziomem gruntu umożliwi zwiększenie energii wiatru od 35% do 45% w odniesieniu do takiego samego turbozespołu umieszczonego na wysokości 100 m.

Daje to potencjalnie dużo większe możliwości produkcji energii elektrycznej oraz zwiększenie przychodu z jej sprzedaży (www.ecoenergia.pl).

3. Przetwarzanie energii wiatru

W energetyce wykorzystywane są turbiny z osią poziomą (najbardziej rozpowszechnione) lub pionową, w których przekształcanie energii kinetycznej wiatru w energię mechaniczną związane jest z siłą nośną generowaną na łopacie wirnika. Przez siłę nośną rozumie się siłę oddziaływania płynu na profil łopatki wirnika turbiny prostopadłą do kierunku prędkości (Chmielniak, 2004; www.itdg.org).

Należy mieć świadomość, że pozyskanie całkowitej energii niesionej przez wiatr nie jest możliwe. W 1919 roku Betz określił maksymalną teoretyczną sprawność elektrowni wiatrowej i do tej pory żadna z istniejących konstrukcji elektrowni wiatrowych jej nie przekroczyła, ani nawet nie osiągnęła. Według Betza w turbinie wiatrowej można zmienić jedynie 16/27, czyli 59% energii kinetycznej zawartej w wietrze na użyteczną energię mechaniczną. Przy czym, ma to miejsce przypadku gdy stosunek prędkości powietrza u_2 (za) do u_1 (przed) turbiną wiatrową wynosi 1/3 (www.intechopen.com).

3.1. Turbiny wiatrowe

Najważniejszym elementem każdej elektrowni wiatrowej bez względu na to czy funkcjonuje ona na poziomie energetyki zawodowej, czy jedynie lokalnie zaspakają potrzeby indywidualnego odbiorcy, jest turbina wiatrowa. To za jej pośrednictwem ze strumienia powietrza pozyskiwana jest energia mechaniczna, a jej parametry konstrukcyjne decydują o właściwościach i osiąganej mocy całej siłowni wiatrowej. Dopiero w oparciu o konkretne rozwiązanie konstrukcji silnika wiatrowego i jego gabaryty dobierane są pozostałe elementy kompletnego już urządzenia, jak na przykład generator, przekładnia lub jej brak czy konstrukcja wsporcza (Polak i Barański, 2006).

Turbiny wiatrowe można podzielić na:

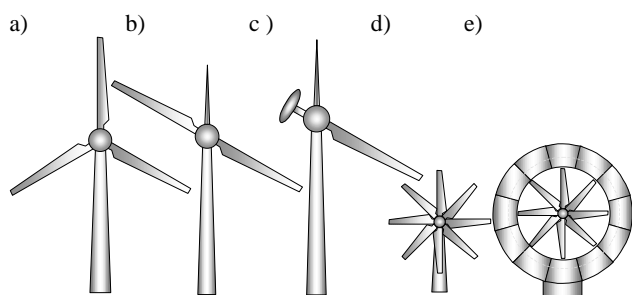
- turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu,
- HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbines*) – rysunek 3,
- rotory wiatrowe o pionowej osi obrotu VAWT (*Vertical Axis Wind Turbines*) – rysunek 4.

Wśród konstrukcji silników wiatrowych o poziomej osi obrotu HAWT wyróżnia się turbiny:

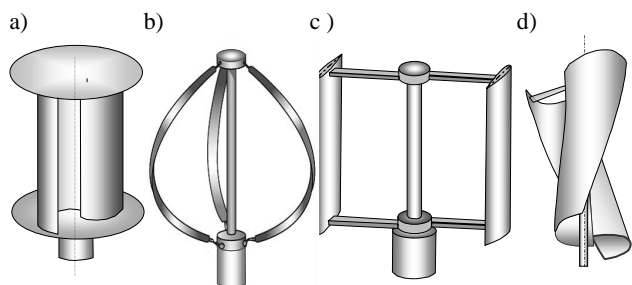
- jednopłatowe,
- dwupłatowe,
- z trzema łopatkami,
- silniki wielopłatowe,
- silniki wielołopatowe wyposażone w dyfuzor.

Do rotorów (turbin) o pionowej osi obrotu zalicza się:

- rotor Savoniusa,
- rotor Darrieusa,
- H-rotory.



Rys. 3. Konstrukcje turbin HAWT (Sorko, 2012):
a) trójłopatowe, b) dwułopatowe, c) jednołopatowe,
d) wielołopatowe, e) wyposażone w dyfuzor



Rys. 4. Konstrukcje turbin VAWT (Sorko, 2012):
a) Savoniusa, b) turbina Darrieusa, c) H-rotor,
d) turbina świderkowa

4. Turbiny o wale poziomym

Powszechnie zastosowanie znalazły turbiny z osią poziomą i stanowią one 95% turbin wiatrowych. Typowa turbina wiatrowa składa się ze stalowej wieży o wysokości 30-100 metrów i ma dwie lub trzy łopaty o średnicy 20-100 m. Istnieją także modele o jednej łopacie z przeciwwagą. Największe turbiny wiatrowe osiągają moce rzędu 5 MW i mają rozpiętość łopat 120 m. Maszyny dużych mocy są instalowane na morzach. W końcu pierwszej dekady tego wieku miały pojawić się na morzach elektrownie wiatrowe o mocy rzędu 6-10 MW, a ostateczny limit wielkości osiowych turbin wiatrowych nie został jeszcze osiągnięty.

5. Turbiny o osi pionowej

Turbiny z osią pionową stanowią około 5% turbin wiatrowych obecnie stosowanych i mają zazwyczaj wysokość do około 30 m i średnicę do 15 m. Historycznie są to pierwsze konstrukcje silników wiatrowych, jednak różne tego typu rozwiązania były dyskredytowane ze względu na wspólny mankament, jakim jest okresowe zginanie łopat w funkcji kąta obrotu (azymut łopaty) oraz pulsujący moment obrotowy wirnika (funkcja azymutu). W celu ograniczenia pulsacji momentu pojawiły się rozwiązania z zastosowaniem łopat helikoidalnych, na przykład turbina Turby opracowana w TU Delft będąca modyfikacją turbiny Darrieusa albo turbina świderkowa będąca modyfikacją rotora Savoniusa.

Wśród turbin wiatrowych o osi pionowej można zasadniczo wyróżnić dwie podstawowe konstrukcje: Savoniusa i Darrieusa przy czym żaden z tych typów nie jest obecnie szeroko stosowany.

5.1. Turbina Darrieusa

Turbina Darrieusa została opatentowana we Francji w 1931 roku. Jej autor G. J.-M. Darrieus, w zasadzie opatentował dwie turbiny – najpopularniejszy obecnie typ, z łopatami wygiętymi w kształt litery C (rys. 4b), oraz tak zwany Giromill, czyli H-rotor z prostymi łopatami.

Działanie tego typu elektrowni wiatrowej opiera się na zjawisku wytwarzania siły nośnej. Siła ta powstaje na specjalnie wyprofilowanych płatach turbin. Każda z łopat turbiny Darrieusa wytwarza maksymalny „ciąg” (moment) jedynie dwa razy na obrót, więc moment obrotowy, ma więc charakter sinusoidalny (Utkin, 2005).

Turbiny o osi pionowej mają szereg zalet: ich praca jest niezależna od kierunku wiatru, nie potrzebują wieży, charakteryzują się cichą pracą nawet przy maksymalnych prędkościach wiatru, ponadto obsługa jest prostsza ze względu na możliwość umieszczenia generatora i skrzyni biegów na powierzchni terenu, a same urządzenia mechaniczne i elektryczne są na ogół prostsze. Nie są pozbawione wad: wiatr nad powierzchnią terenu jest znacznie słabszy i obniża znacznie sprawność konstrukcji, a wymiana samego łożyska wymaga rozbioru całej elektrowni. Ponadto wirnik Darrieusa wymaga, ze względu na praktycznie zerowy moment startowy, wstępnego rozpędzenia. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie dwóch pomocniczych wirników Savoniusa.

5.2. Turbina Savoniusa

Wynaleziona w Finlandii w 1922 roku turbina Savoniusa w widoku z góry przypomina literę S. Koncepcja wirnika typu Savoniusa opiera się przede wszystkim na wykorzystaniu zjawiska siły parcia aerodynamicznego. Rotor tego typu obraca się relatywnie powoli, lecz generuje spory moment obrotowy. Pod względem sprawności nie może konkurować z klasycznymi konstrukcjami o osi poziomej czy też z wirnikiem Darrieusa, ale jego niewątpliwą zaletą jest prosta konstrukcja. Wirniki tego typu zwykle wykorzystywane są do napędzania pomp oraz produkcji energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych o małych mocach. Prostota konstrukcji i możliwość jej wykonania z materiałów ogólnie dostępnych, przy użyciu podstawowych narzędzi sprzyja rozprzestrzenianiu się konstrukcji typowo amatorskich (budowanych z blachy falistej lub stalowych beczek).

Model Savoniusa ma liczne zalety – duży dodatni moment obrotowy umożliwia pracę przy niskich prędkościach wiatru. Rotor pracuje niezależnie od kierunku wiatru, przez co nie potrzebuje mechanizmu „ustawiania na wiatr” i sterowania, a jednocześnie jest odporny na silny wiatr. Nawet przy wietrze 40 m/s nie wymaga zatrzymania, gdyż kształt wirnika zapewnia aerodynamiczne ograniczenie prędkości obrotowej. Ponadto, charakteryzuje się możliwością łatwego montażu na obiektach (dach budynku, słup) bez konieczności budowania wysokich masztów. Generator do produkcji energii elektrycznej można zlokalizować na poziomie

gruntu co umożliwia łatwy do niego dostęp. Sama konstrukcja może być przenośna dzięki łatwemu montażowi i demontażowi. Dodatkowo, posiada estetyczny wygląd – podczas pracy cykliczne wrażenie zmiany kształtu daje nowe możliwości wykorzystania jako element architektury krajobrazu. Dodatkowym atutem jest cicha praca przez co nie jest źródłem uciążliwego hałasu (Polak i Barański, 2006; Hunter, 2007; www.uwm.edu.pl).

Konstrukcja ta nie jest pozbawiona wad, jednak jest ich znacznie mniej niż zalet. Wadą tego typu konstrukcji są wolne obroty łopat, porównywalne z prędkością wiatru, uniemożliwiające bardziej efektywne wykorzystanie ich do produkcji energii elektrycznej, zwłaszcza w zawodowych sieciach elektroenergetycznych. Maksymalną moc tej turbiny można oszacować na poziomie 55% (Gomułka i in., 2006). Niska sprawność, sprawia, że aby wytworzyć taką samą ilość energii, co tradycyjne turbiny, turbina Savoniusa wymaga znacznie większych gabarytów. Ponadto ze względu na niewielką prędkość obrotową, potrzebny jest generator wolnobieżny lub przekładnia, której zastosowanie zmniejsza dodatkowo sprawność urządzenia i zwiększa emisję hałasu (Hunter, 2007; Nalepa i in., 2011).

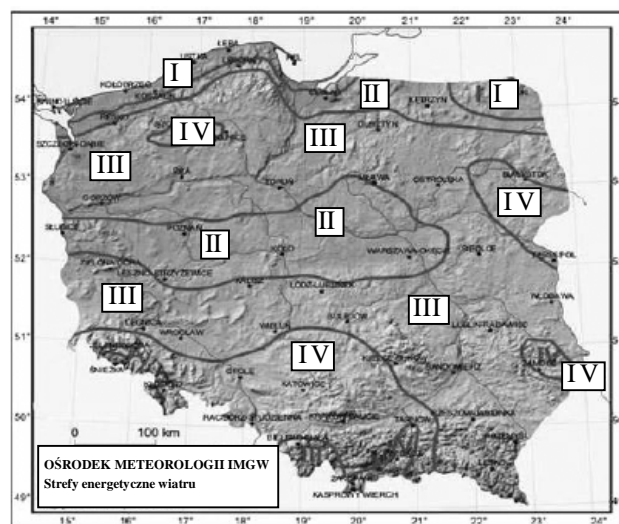
6. Zasoby energii wiatru w Polsce

Podstawowym parametrem przybliżającym możliwość oceny warunków wiatrowych jest średnia roczna lub sezonowa prędkość wiatru. Z punktu widzenia opłacalności inwestowania w energetykę wiatrową prędkość wiatru na danym terenie musi przekraczać 4 m/s. Wieloletnie obserwacje i pomiary dostarczają informacji na temat kierunków i prędkości wiatrów jednak oceniając zasobności energetycznej wybranego terenu istotne znaczenie ma sezonowa zmienność energii wiatru informująca o zmianach i wahaniami średniorocznej prędkości wiatru. Na terenie Polski roczna sezonowość przejawia się występowaniem w okresie letnim prędkości wiatru wynoszącej średnio od 50 do 70% średnich prędkości rocznych, natomiast w zimie wartości te są wyższe i wynoszą około 150-170% (www.imgw.pl).

Oceny zasobów energetycznych wiatru opierają się na materiale obserwacyjnym gromadzonym przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW). Według prof. Haliny Lorenc z IMGW obszar Polski można podzielić na 5 stref energetycznych warunków wiatrowych:

- strefa I – wybitnie korzystna,
- strefa II – bardzo korzystna,
- strefa III – korzystna,
- strefa IV – mało korzystna,
- strefa V – niekorzystna.

Zaprezentowana mapa zawiera opis jakościowy, a nie ilościowy stref energetycznych wiatru. Jest to informacja mogąca prowadzić do nieporozumień, gdyż warunki wiatrowe, tak zwane wybitnie korzystne w Polsce są dalekie od najbardziej korzystnych warunków wiatrowy w Europie, takich jak Dania, Szkocja, Norwegia (Lubośny, 2009).



Rys. 5. Strefy energetyczne wiatru w Polsce (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej)

Potencjał energetyczny wiatru na terenie Polski został oszacowany na poziomie 80-90 mld kWh rocznie, co byłoby w stanie pokryć prawie dwie trzecie krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Około 60% powierzchni Polski można zakwalifikować do obszarów o dobrych warunkach umożliwiających eksploatację wiatru jako odnawialnego źródła energii. Należy jednak uwzględnić to, że na terenie naszego kraju występują znaczne regionalne różnice w zasobach wiatru. W rzeczywistych warunkach produkcja energii elektrycznej przez elektrownie wiatrowe może osiągnąć 17% pokrycia bilansu energetycznego naszego kraju. Świadczy to o tym, że energetyka wiatrowa nie będzie miała decydującego udziału w ogólnym bilansie produkcji energii krajowej, ale pozwoli zmniejszyć emisję zanieczyszczeń do atmosfery (Boczar, 2008; energiazwiatru.w.interia.pl).

6.1. Wykorzystanie energii wiatru w Polsce

Biorąc pod uwagę kryterium możliwości wykorzystania energii wiatru obszary najbardziej korzystne na lokalizację elektrowni wiatrowych, gdzie średnie roczne prędkości wiatru przekraczają 4 m/s, to:

- środkowa część wybrzeża morza Bałtyckiego, szczególnie obszary najbardziej wysunięte na północ od Koszalina po Hel oraz pobrzeże Słowińskie i Kaszubskie;
- rejon wyspy Wolin;
- Suwalszczyzna;
- Mazowsze i środkowa część pojezierza Wielkopolskiego;
- Beskid Śląski i Żywiecki;
- Bieszczady i Pogórze Dynowskie;
- dolina Sanu od Sandomierza po granice państwa.

Gomułka i Woźniak (2008) przedstawili stopień wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej. W celu określenia stopnia wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej zainstalowanej przy różnych lokalnych zasobach energii wiatru przyjęli elektrownie

z wirnikiem trójłopatkowym typ EW 160 NOWOMAG (tab. 1).

Tab. 1. Dane techniczne elektrowni EW 160 NOWOMAG przyjętej do analizy

Moc EW P	160 kW
Średnica wirnika D	22 m
Wysokość wieży H	30 m
Prędkość obrotowa n	46,6 obr./min
Prędkość wiatru – startu u_r	4 m/s
Prędkość wiatru – obl. u_n	14 m/s
Masa całkowita m	13 800 kg
Łopaty o regulowanym kącie nastawienia	

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzili, że w warunkach wiatrowych Polski godny analizy jest przedział średniorocznych prędkości wiatru od 4 m/s do 6 m/s. Poniżej średniorocznej prędkości 4 m/s budowa elektrowni wiatrowej nie ma uzasadnienia ekonomicznego, bowiem czas zwrotu inwestycji jest większy niż żywotność obiektu. Natomiast 6 m/s to największa średnioroczna prędkość spotykana na terenie Polski. Dla terenów, gdzie średnioroczna prędkość wiatru mieści się w przedziale od 4 m/s do 6 m/s, czyli dla warunkowych Polski, stopień wykorzystania mocy będzie mieścić się w granicach od 7 % do około 25 %.

Aktualnie w Polsce pracuje ponad 80 profesjonalnych turbin wiatrowych, które wyposażone są w generatory asynchroniczne i podłączone są do zawodowych sieci energetycznych. Przestrzenny rozstaw elektrowni wiatrowych pokrywa się z najbardziej korzystnymi strefami energetycznymi. Największa liczba pracujących elektrowni wiatrowych skupia się na wybrzeżu na zachód od Władysławowa i ich łączną moc przekracza 80% sumarycznej mocy w całym kraju. Wskaźnik ten będzie wzrastał, gdyż w województwach pomorskich jest przewidywana największa liczba inwestycji.

Hamulcem w rejonie północnym Polski dla rozwoju energetyki wiatrowej mogą być ograniczone możliwości przesyłowe istniejących sieci elektroenergetycznych. Przy słabo rozwiniętej sieci wysokich napięć (110 kV), w dłuższej perspektywie mogą pojawić się problemy z odbiorem energii z elektrowni wiatrowych na Pomorzu i Suwalszczyźnie. Rozwój energetyki wiatrowej jest uwarunkowany nie tylko odpowiednimi warunkami meteorologicznymi, ale także dostępem do sieci elektroenergetycznej.

Bilans energetyczny zagospodarowania energii wiatru w skali kraju nie uwzględnia możliwości wykorzystania energii wiatru o prędkościach średniorocznych mniejszych niż 4 m/s. Natomiast rozwiązanie konstrukcyjne rotorów o osi pionowej umożliwiają pozyskiwanie energii już przy wiatrach o sile około 2 m/s, które dominują na terenie Polski (występują prawie 70% dni w ciągu roku). Wykorzystanie tej energii ma miejsce głównie w indywidualnych gospodarstwach domowych, a nie dla celów przemysłowych, to jest sprzedaży jej do sieci zawodowej, jest niemniej interesującą formą poprawy bilansu energetycznego.

7. Wykorzystanie energii wiatru przy użyciu rotorów wiatrowych o osi pionowej

Na terenie Polski występuje wiele regionów pozbawionych tradycyjnych źródeł energii oraz takich, na których sieć energetyczna jest słabo rozwinięta. Obszarem takim jest północno-wschodnia część naszego kraju, gdzie często w przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych wiele gospodarstw pozostaje pozbawionych energii elektrycznej. Takie obszary mogą być wspomagane farmami wiatrowymi pod warunkiem występowania dostatecznie dużej prędkości wiatru, jak i posiadaniem odpowiedniego terenu pod ich lokalizację. W przypadku mniej korzystnych warunków wiatrowych, strategicznego znaczenia nabierają małe elektrownie wiatrowe zaspakajające potrzeby odbiorcy indywidualnego. W skali elektroenergetyki krajowej rozwiązania takie nie mają wielkiego znaczenia, ale w przypadku zaspokojenia lokalnych potrzeb nabierają istotnego wydzźwięku. Przede wszystkim wpływają na poprawę lokalnego bezpieczeństwa energetycznego pozwalając uzyskać szereg korzyści gospodarczych, ekologicznych jak i społecznych.

Instalacja takiej siłowni z reguły nie wymaga dużych nakładów finansowych, ani nie pociąga za sobą potrzeby specjalnego wydzielenia terenu do ich montażu. Posiadają one szereg istotnych zalet: nie są źródłem uciążliwego hałasu czy też innych niedogodności zaliczanych w poczet czynników degradujących bądź zagrażających środowisku naturalnemu. Stosowanie turbin wiatrowych małej mocy jest możliwe zarówno w gospodarstwach wiejskich, jak i miejskich. Można je zalecać do stosowania na obszarach przyrodniczo cennych, nawet na terenach chronionego krajobrazu oraz wszędzie tam gdzie nie ma sieci przesyłowych energetyki zawodowej (rys. 6 i 7).



Rys. 6. Nowoczesna odmiana konstrukcyjna turbiny Savonius'a (świderkowa) firmy Windside do zasilania indywidualnego odbiorcy energii elektrycznej (www.windside.com)



Rys. 7. Nowoczesna odmiana konstrukcyjna turbiny Savonius'a (świderkowa) wykonana przez firmę Windside w zabudowie miejskiej – Japonia (www.windside.com)

Przyszłościowe mogą się okazać się rozwiązania budowy siłowni wiatrowych małej mocy od 1,3 do 6 kW z stosowaniem turbiny z wirnikami pionowymi. Można je montować na stosunkowo niewielkiej wysokości 6-8 m. Pracują one niezależnie od kierunku strumienia wiatru. Godny uwagi jest fakt, że takie działania przynoszą znaczne oszczędności i w perspektywie czasu przyczynią się poprawy stanu środowiska naturalnego.

Turbiny małej mocy o wale pionowym mogą być traktowane jako alternatywne urządzenia produkujące energię elektryczną dla indywidualnego użytkownika do podgrzewania wody, funkcjonowania drobnego sprzętu w gospodarstwach domowych, systemów wentylacji i oświetlenia. Zastosowanie zespołu tych turbin pozwala zaspokoić zapotrzebowanie na energię elektryczną w wysokości 10 kWh/d.

Pozyskiwanie energii z wiatru na potrzeby indywidualnego odbiorcy różni się od produkcji energii przeznaczonej do sprzedaży zawodowej sieci elektroenergetycznej. Produkowana na własne cele energia nie musi spełniać rygorystycznych parametrów i może być produkowana w systemie buforowanym i dopiero w późniejszym etapie przekształcona do parametrów wymaganych przez odbiorniki znajdujące się w gospodarstwie domowym.

W przypadku energetyki wiatrowej małej mocy również tereny zabudowane dużych miast są miejscem atrakcyjnym dla jej zastosowania. Wynika to z możliwości łatwego montażu elektrowni wiatrowych na znacznych wysokościach, na przykład na dachach budynków lub wykorzystania efektu zwiększania się prędkości wiatru przy krawędziach budynków. Preferowanie w tym przypadku rozwiązania elektrowni wiatrowych z wirnikami o osi pionowej mogą pracować przy wiatrach wiejących z różnych, nawet ciągle zmieniających się kierunków. Dodatkowo, zabudowa

miejska charakteryzuje się dużym udziałem występowania zjawisk turbulencyjnych. Można wyodrębnić wiele sytuacji przestrzennych, gdzie występują obszary wzrostu prędkości, czy miejsca gdzie występują korytarze o podwyższonej turbulencji przepływu mas powietrza, które z powodzeniem mogą być wykorzystane do lokalizacji rotorów wiatrowych o pionowej osi obrotu

8. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wykorzystania energii wiatru wynikają następujące wnioski:

1. Energia wiatru jest ogólnie dostępnym źródłem energii odnawialnej, a jej potencjał jest niewyczerpalny. Istnieje możliwość jej konwersji w energię elektryczną i możliwość stosowania w energetyce zawodowej na obszarach gdzie średnia prędkość strumienia wiatru jest wyższa od 4 m/s.

2. Energia wiatru nie może być stabilnym źródłem energii na obszarze Polski z przyczyn naturalnych. Okres występowania silnych wiatrów o prędkości powyżej 5,5 m/s jest ograniczony – wynosi około 15% dni w roku i tylko w wąskim pasie terenów nadmorskich.

Dość stabilnym źródłem energii odnawialnej dla Polski może być energia słabych i średnich wiatrów o prędkości 2,0-5,5 m/s, które występują przez okres ponad 73% dni w roku:

- energię słabych i średnich wiatrów można przetwarzać przy zastosowaniu turbin o pionowej osi obrotu w energię do indywidualnego wykorzystania w instalacjach domowych i małych przedsiębiorstwach;
- turbiny o pionowej osi obrotu dają możliwość pozyskiwania energii już przy wiatrach powyżej 1,5 m/s i mają szereg istotnych zalet;
- zastosowanie turbin o pionowej osi obrotu jest interesującą alternatywą dla tradycyjnych elektrowni wiatrowych o wale poziomym montowanych na wysokich masztach, które zanieczyszczają naturalny krajobraz i są ekonomicznie trafnymi rozwiązaniami tylko dla pasa przybrzeżnego.

Literatura

- Boczar T. (2008). Energetyka wiatrowa: aktualne możliwości wykorzystania. *Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola*, Warszawa.
- Chmielniak J.T. (2004). Technologie energetyczne. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Flaga A. (2008). Inżynieria wiatrowa: podstawy i zastosowania. *Arkady*, Warszawa.
- Gumułka S., Knap T., Strzelczyk P., Szczerba Z. (2006). Energetyka Wiatrowa. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH*, Kraków.
- Gumułka S., Woźniak A. (2008). Czysta Energia - Jak określić stopień wykorzystania mocy elektrowni wiatrowej? *Wydawnictwo Komunalne Abrys*.
- Hunter B. (2007). My Savonius Rotor-Making Electricity. www.homesopen.com/wind/savonius.pdf
- Johnson G.L. (1985). Wind energy systems. *Prentice Hall*.

- Lebiedowski A. (2008). Proekologiczne uwarunkowania potrzeby wykorzystania energii słabych wiatrów. Rozprawa doktorska, *Politechnika Białostocka*.
- Lewandowski W.M. (2010). Proekologiczne odnawialne źródła energii. *WNT*, Warszawa.
- Lubośny Z. (2009). Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. *WNT*.
- Michalak P. (2009). Ocena zasobów energii wiatru na potrzeby małej energetyki wiatrowej. *Elektrotechnika i Elektronika*, Tom 28. Zeszyt 1-2.
- Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Piechocki J., Bogacz P. (2011). Poradnik małej energetyki wiatrowej. Olsztyn.
- Polak A., Barański M. (2006). Porównanie turbin wiatrowych. Komel, Katowice, *Zeszyty problemowe, Maszyny Elektryczne* Nr 74,
- Soliński I. (1999). Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej. *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, Kraków.
- Sorko S.A. (2012) Studium odnawialnych źródeł energii materiały SD WBiŚ PB
- Utkin M. (2005) Turbiny wiatrowe. *Młody Technik*, 2/2005.
- Fundamental and Advanced Topics in Wind Power 2011 Edited by Rupp Carriveau, Ch-2 M. Ragheb and A. M. Ragheb: Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, <http://www.intechopen.com/books>
- Portal internetowy: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, <http://www.imgw.pl>
- Odnawialne źródła energii, Publikacje elektroniczne Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie <http://www.uwm.edu.pl/kolektory/>

Walory energetyczne wiatru w Polsce, energiawiatru.w.interia.pl

Baza Danych Odnawialnych Źródeł Energii Województwa Podkarpackiego, Metody oceny zasobów energetycznych wiatru, www.baza-oze.pl

WIND ENERGY UTILISATION BASED ON SMALL VERTICAL AXIS WIND TURBINES

Abstract: The purpose of this paper is to characterise the wind energy and to describe its conversion into electric energy. The article presents two design variants for wind energy conversion which are vertical axis wind turbine and horizontal axis wind turbine, pointing out their advantages and disadvantages. Furthermore the climatic conditions in Poland were analysed, regarding wind resources and possible locations of wind turbines. As a result of analyses the vertical axis wind turbine was appointed as the solution which is more suitable for Polish region, allowing for better and wider utilisation of wind energy (in comparison to the other design). The power obtained this way is used as a support for existing individual light and heating systems, and improves local energy security.

Opracowanie wykonano w ramach realizacji studium badawczego na Studiach Doktoranckich na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej

REDUKCJA EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ W WYNIKU TERMOMODERNIZACJI ZABYTKOWYCH OBIEKTÓW SAKRALNYCH

Joanna PIOTROWSKA-WORONIAK, Grzegorz WORONIAK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule przedstawiono efekty ekologiczne, jakie można uzyskać po wykonaniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych na podstawie audytów energetycznych wykonanych w zabytkowych budynkach sakralnych. Analizie poddane zostały cztery kościoły zlokalizowane na terenie diecezji Drohiczyńskiej, w dekanacie sarnackim – kościół numer 1 i numer 2, w dekanacie sokołowskim – kościół numer 3 i w dekanacie bielskim – kościół numer 4.

Słowa kluczowe: zabytkowy obiekt sakralny, emisja zanieczyszczeń, redukcja emisji, wskaźniki zanieczyszczeń.

1. Wprowadzenie

Emisja substancji zanieczyszczających NO_x , CO , SO_2 oraz zanieczyszczeń organicznych, a także lotnych związków organicznych jest ściśle uzależniona od technologii spalania, rodzaju paliwa i technicznych uwarunkowań jej realizacji, czyli techniki spalania oraz charakterystyki fizykochemicznej zastosowanego paliwa i jej stabilności. Również spalanie biomasy (OZE) w piecu/kotle o przestarzałej konstrukcji skutkuje dużą emisją toksycznych zanieczyszczeń (Kubica, 2007). Procesy energetycznego spalania paliw, zwłaszcza węgla, są głównym źródłem antropogenicznej emisji zanieczyszczeń. Ponad 75% emisji NO_x i SO_2 , około 70% emisji CO , ponad 75% emisji pyłów oraz ponad 90% CO_2 pochodzi z procesów spalania paliw.

Wśród zanieczyszczeń emitowanych ze spalania paliw stałych, głównie węgla w postaci aerozolu (smogu), do szczególnie niebezpiecznych zaliczane są pyły, które mogą zawierać metale ciężkie, odpowiedzialne za choroby układu oddechowego i krążeniowego, różnego rodzaju alergie.

W artykule określono, jaki wpływ ma termomodernizacja na poprawę jakości powietrza atmosferycznego. Zmniejszenie zużycia energii, poprzez wprowadzenie przedsięwzięć termomodernizacyjnych jest najefektywniejszym sposobem redukcji emisji do atmosfery szkodliwych substancji takich, jak dwutlenek siarki, tlenki azotu, pyły, czy dwutlenek węgla, bo jest sposobem bezpośrednim.

W dwóch kościołach zaproponowano zamianę dotychczasowego źródła ciepła na kocioł opalany biomasą. Biomasa uważana jest za paliwo, które może zastąpić klasyczne paliwa, zwłaszcza węgiel. Jest paliwem

odnawialnym, a w rozliczeniach emisji CO_2 traktowana jest jako paliwo nie wnoszące emisji gazów cieplarnianych (Wielgosiński, 2009).

Na ochronę i odnowę zabytkowych obiektów kościoły i kościelne osoby prawne, a także związki wyznaniowe mogą korzystać z unijnych środków dotacyjnych. Przewidziane są programy operacyjne na odnowę obiektów sakralnych, zagospodarowanie terenów przykościelnych, rewitalizację i termomodernizację budynków sakralnych oraz ich otoczenia (www.fundusze-europejskie.pl). Samodzielna realizacja, tak dużych inwestycji w większości przypadków jest bardzo trudna lub niemożliwa do zrealizowania. Występując o środki z funduszu unijnego należy wykonać audyt energetyczny, który potwierdzi zmniejszenie zużycia energii cieplnej i pokaże efekty energetyczne, ekonomiczne i dodatkowo ekologiczne.

W artykule przedstawiono efekty ekologiczne, jakie można uzyskać przeprowadzając termomodernizację obiektów sakralnych i modernizując instalację grzewczą oraz źródło ciepła pokazując w ten sposób zasadność przeprowadzania tych czynności. Efekty energetyczne i ekonomiczne omawianych budynków sakralnych przedstawione zostały we wcześniejszym artykule autorów (Piotrowska-Woroniak i Woroniak, 2014).

2. Wyznaczenie emisji szkodliwych substancji przed i po termomodernizacji w obiektach sakralnych

Obliczanie wielkości emisji substancji zanieczyszczających (SO_2 , NO_x , CO_2) wprowadzanych do powietrza przy energetycznym spalaniu paliw, w przypadku paliw stałych, ciekłych i gazowych, obliczono z zależności (Materiały, 1996):

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: g.woroniak@pb.edu.pl

$$E = B \cdot w \text{ [kg / rok]} \quad (1)$$

gdzie: B jest ilością spalonego paliwa w Mg/rok, w jest wskaźnikiem emisji dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, tlenku węgla, dwutlenku węgla odpowiednio w kg/Mg paliwa, kg/m^3 , $\text{kg}/10^6\text{m}^3$.

Emisji CO_2 ze spalania biomasy (drewna opałowego i odpadów pochodzenia drzewnego, odpadów komunalnych biogenicznych i biogazu) nie wliczono do sumy emisji ze spalania paliw, zgodnie z zasadami Wspólnotowego systemu handlu uprawnieniami do emisji oraz IPCC. Podejście to jest równoważne stosowaniu zerowego wskaźnika emisji dla biomasy (Wskaźniki opałowe, 2012).

Emisję pyłu przy spalaniu paliw stałych – $E_{\text{pył}}$ [kg] wyznaczono w oparciu o następującą zależność (Materiały opałowe, 1996):

$$E_{\text{pył}} = B \cdot w \cdot \frac{(100 - \eta)}{(100 - k)} \quad (2)$$

gdzie: w jest wskaźnikiem unosu pyłu w kg/Mg paliwa, η jest sprawnością urządzenia odpylającego w %,

natomiast k jest to zawartość części palnych w pyłe w %.

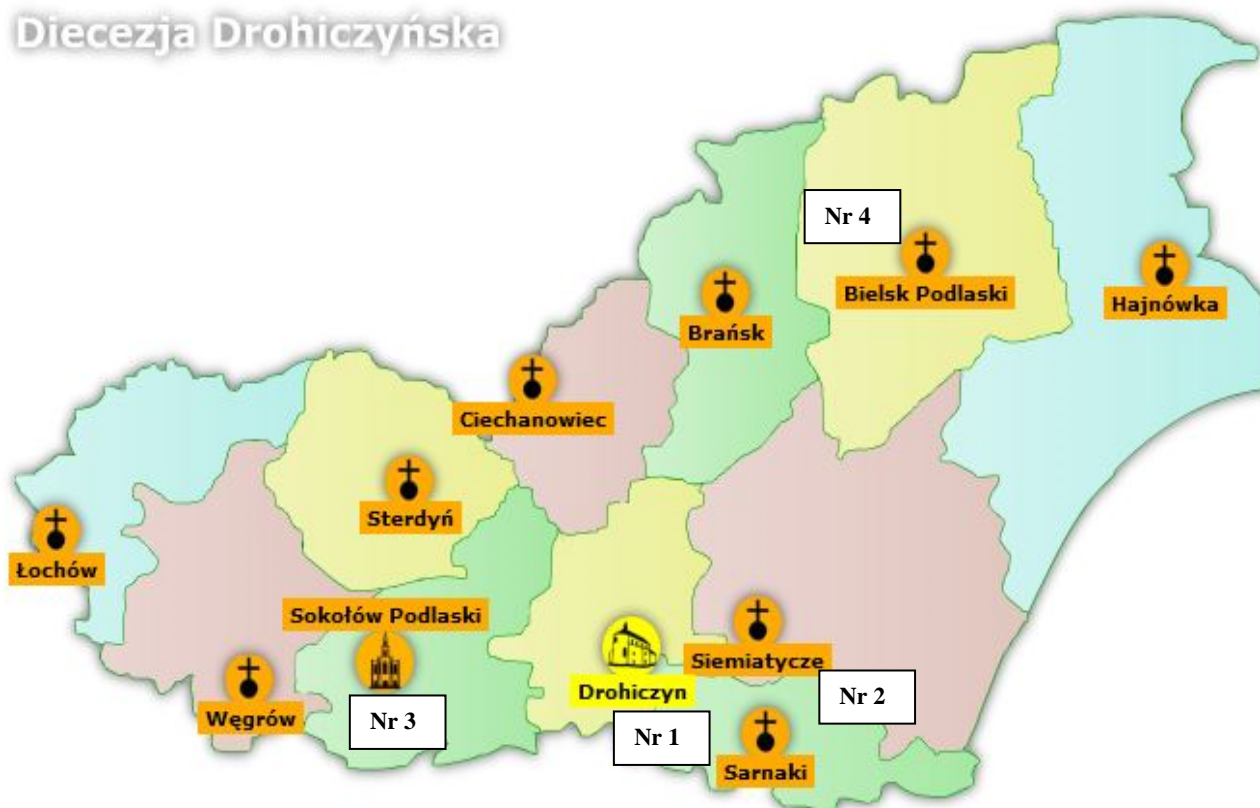
Obliczenie wielkości emisji zanieczyszczeń przed i po termomodernizacji wykonano przy wartości opałowej paliwa, w przypadku: drewna 15,6 MJ/kg – kościół numer 1 i numer 4; węgla 22,52 MJ/kg – kościół numer 2; oleju 40,19 MJ/kg (olej ciężki – zawartość siarki 0,2%; olej lekki -zawartość siarki 0,2%) – kościół numer 1 i numer 3; gazu propan-butan 96,85 MJ/m³ (zawartość siarki 40mg/m³) – kościół numer 3 (Wskaźniki opałowe, 2012).

3. Charakterystyka budynków sakralnych

Analizowane obiekty sakralne zlokalizowane na terenie diecezji Drohiczyńskiej, w dekanacie sarnackim – kościół numer 1 i numer 2, w dekanacie sokołowskim – kościół numer 3 i w dekanacie bielskim – kościół numer 4. Na rysunku 1 przedstawiono lokalizację kościołów na terenie diecezji Drohiczyńskiej.

W tabeli 1 przedstawiono ogólną charakterystykę energetyczną budynków kościołów przed i po termomodernizacji zgodnie z audytami energetycznymi (Zwolski, 2011a, b, c; NAPE, 2011).

Diecezja Drohiczyńska



Rys. 1. Lokalizacja obiektów sakralnych na terenie diecezji Drohiczyńskiej (www.drohiczyn.opoka.org.pl)

Tab. 1. Ogólna charakterystyka energetyczna budynków kościołów przed i po termomodernizacji (Zwolski, 2011a, b, c; NAPE, 2011)

Obiekt sakralny	Rodzaj paliwa w źródle ciepła		Całkowita sprawność systemu grzewczego* [%]		Zapotrzebowanie na moc cieplną q_0 [kW] na cele c.o.		Zużycie energii cieplnej na cele c.o. Q_0 [GJ]		Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na ciepło (energię końcową) E_{KH} [kWh/m ² a]	
	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po	przed	po
Kościół numer 1	olej ciężki	biomasa	71,4	88,2	68,46	55,42	275,75	187,90	402,08	273,99
Kościół numer 2	węgiel	węgiel	59,0	68,6	12,40	6,02	98,66	42,18	548,13	234,34
Kościół numer 3	ogrzewanie elektryczne i na gaz płynny propanbutan	olej opałowy lekki	79,6	96,0	177,51	109,51	637,88	329,05	281,26	207,77
Kościół numer 4	ogrzewanie elektryczne	biomasa	88,5	70,0	97,90	45,17	308,26	126,53	246,71	123,65

*Całkowita sprawność systemu grzewczego – na którą składa się: sprawność wytwarzania ciepła, przesyłania ciepła, regulacji i wykorzystania systemu grzewczego i akumulacji ciepła.

4. Efekty ekologiczne po przeprowadzeniu termomodernizacji budynków kościołów i modernizacji źródeł ciepła

Na efekt ekologiczny w obiektach sakralnych wpłynęły przedsięwzięcia w obrębie bryły budynku, jak również modernizacje źródeł ciepła. Z uwagi na zabytkowy charakter obiektów nie była możliwa poprawa izolacyjności przegród zewnętrznych metodami tradycyjnymi. Jedynie w kościele numer 2 możliwe było docieplenie ścian zewnętrznych płytami z wełny mineralnej pod elewacją z desek. Uwzględniając wymagania konserwatora zabytków, w kościołach zaproponowano docieplenie stropu pod strychem, docieplenie podłogi na gruncie, wymianę okien i drzwi oraz położenie tynków ciepłochronnych, z wyjątkiem kościoła numer 2. Prace termomodernizacyjne obejmowały także wymianę instalacji c.o. i źródła ciepła, oprócz kościoła numer 2, gdzie pozostawiony został kocioł węglowy, ze względu na dobry stan techniczny. W trzech modernizowanych obiektach sakralnych zaproponowane zostało ogrzewanie podłogowe (kościół numer 1, 3 i 4) razem z wymianą posadzek kamiennych, w kościele numer 2 ogrzewanie z grzejnikami

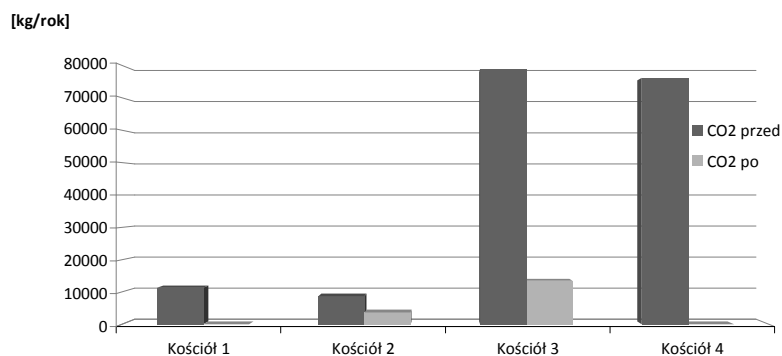
kanałowymi. Zaproponowane ogrzewanie podłogowe umożliwi utrzymanie parametrów temperatury i wilgotności na stabilnym poziomie, co jest ważne ze względu na obrazy, czy ścienne freski.

Dokładny opis prac termomodernizacyjnych analizowanych kościołów zgodnych z audytem energetycznym (Zwolski, 2011a, b, c; NAPE, 2011) dotyczący omawianych budynków przedstawiono w artykule (Piotrowska-Woroniak i Woroniak, 2014).

Przeprowadzając termomodernizację budynków sakralnych i modernizując źródło ciepła, uzyskano zmniejszenie emisji zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery podczas spalania paliw przed i po termomodernizacji. Uzyskane efekty ekologiczne wyliczono w oparciu o dane wskaźnikowe emisji zanieczyszczeń (Materiały, 1996).

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń emisji zanieczyszczeń przed i po termomodernizacji. Na rysunku 2 pokazano wyniki emisji CO₂ w formie graficznej.

W przypadku spalania drewna (kościół numer 1 i numer 4) przyjmuje się emisję CO₂ równą zero, ponieważ podczas wzrostu drzewa asymilują tyle CO₂, ile emitują podczas ich spalania, stąd też bilans zanieczyszczeń jest zero.

Rys. 2. Obliczone emisje CO₂ przed i po termomodernizacji kościołów

Tab. 2. Wyniki emisji zanieczyszczeń przed i po termomodernizacji

L.p.	Zanieczyszczenia	Rodzaj kotłowni/ zużycie paliwa		Emisja zanieczyszczeń [kg/rok]		Redukcja zanieczyszczeń	
		Przed	Po	Przed modernizacją	Po modernizacji	[kg/rok]	[%]
Kościół numer 1							
1	SO ₂			26,07	9,63	16,44	63,06
2	CO ₂	olejowa B ₀ = 6,86	biomasa B ₁ = 12,04	11 319	0	0	100
3	Pył	Mg/rok	Mg/rok	12,35	20,47	wzrost	-
4	NO _x			34,3	3,61	30,69	89,48
Kościół numer 2							
1	SO ₂			0,59	0,25	0,34	57,63
2	CO ₂	węgiel B ₀ = 4,381	węgiel B ₁ = 1,873	8 762	3 746	5 016	57,25
3	Pył	Mg/rok	Mg/rok	52,57	22,48	30,09	57,24
4	NO _x			4,38	1,87	2,51	57,31
Kościół numer 3 *							
1	SO ₂	gaz propan- butan		195,44	31,11	164,33	84,08
2	CO ₂	B ₀ = 3293	olej	78 850	13 508	72 091	91,43
3	Pył	m ³ /rok i prąd	B ₁ = 8,187	160,59	14,74	145,64	90,69
4	NO _x	B ₀ = 88,596 MWh/rok	Mg/rok	113,18	40,94	71,60	63,26
Kościół numer 4							
1	SO ₂	energia	biomasa	188,64	6,49	182,15	96,56
2	CO ₂	elektryczna		76 209	0	0	100
3	Pył	B ₀ = 85,628	B ₁ = 8,11	155,16	13,79	141,37	91,11
4	NO _x	MWh/rok	Mg/rok	105,32	2,43	102,89	97,69

* w kościele numer 3 zużycie gazu propan-butan i energii elektrycznej na cele grzewcze wynosi po 50%.

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy ekologicznej czterech wybranych kościołów zlokalizowanych na terenie diecezji Drohiczyńskiej. Uzyskane efekty ekologiczne można uzyskać w związku z przeprowadzeniem inwestycji w obrębie bryły budynku, jak również, w trzech kościołach (numer 1, 3 i 4), zmian w źródłach ciepła (Zwolski, 2011a, b, c; NAPE, 2011).

Zamiana starych źródeł ciepła na źródła ciepła spalające biomasę (kościół numer 1 i 4) była spowodowana poszukiwaniem przede wszystkim paliwa ekonomicznego i taniego, jednocześnie efektywnie energetycznego i w miarę możliwości ekologicznego. Wymogi te spełniała biomasa, która traktowana jest jako paliwo odnawialne i uznawana w rozliczeniach emisji CO₂, jako paliwo o zanieczyszczeniu zerowym. W kościele numer 3, gdzie ogrzewanie obiektu odbywało się w systemie mieszanym: energia elektryczna i gaz propan-butan, na życzenie inwestora zostało zamienione na kotłownię bezobsługową, na olej opałowy lekki.

W każdym z kościołów, w wyniku prac termomodernizacyjnych można zaobserwować redukcję zanieczyszczeń. Najmniejsze zmniejszenie odprowadzanych zanieczyszczeń do atmosfery jest w kościele numer 2, związane jest to tylko z poprawą jakości termicznej budynku, bez ingerencji w źródło ciepła. Natomiast w pozostałych obiektach, oprócz zmian w bryle budynku wprowadzono zmiany w źródle ciepła, zastępując je innymi paliwami i to w dużym stopniu wpłynęło na efekty ekologiczne.

Wyniki analizy ekologicznej przedstawione w artykule wykazują zasadność przeprowadzenia termomodernizacji obiektów sakralnych i modernizacji źródeł ciepła. Można uzyskać redukcję wszystkich analizowanych emisji zanieczyszczeń między innymi: SO₂, które uległo redukcji do poziomu średnio około 75%; NO_x średnio do poziomu około 77%; CO₂ uległo całkowitej redukcji w przypadku kotłowni na biomasę w kościołach numer 1 i 4, w pozostałych dwóch kościołach średnio do 74% oraz pyłów do powietrza atmosferycznego na poziomie około 64%, z wyjątkiem kościoła numer 1, gdzie nastąpił wzrost

emisji pyłu.

Uzyskane efekty ekologiczne w pełni pozwalają sądzić, że termomodernizacja obiektów sakralnych, jak również modernizacja źródeł ciepła są w pełni uzasadnione i przyczyniają się do redukcji emisji głównych zanieczyszczeń powietrza: dwutlenku siarki, tlenu azotu, pyłów, dwutlenku węgla, a tym samym do ochrony środowiska naturalnego.

Podczas termomodernizacji tego typu obiektów należy pamiętać, żeby pogodzić wymogi nowoczesności z utrzymaniem tradycyjnego charakteru obiektów.

Literatura

- Kubica K. (2007). Efektywne i przyjazne środowisku źródła ciepła – ograniczenie niskiej emisji. Poradnik. *Polski Klub Ekologiczny*, Katowice.
- Materiały (1996). Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, seria 1/96, Wskaźniki emisji substancji zanieczyszczających wprowadzanych do powietrza z procesów energetycznego spalania paliw, Warszawa.
- NAPE (2011). Audyt energetyczny budynku kościoła parafii rzymsko-katolickiej w Wyszkach. *NAPE*, Białystok.
- Piotrowska-Woroniak J., Woroniak G. (2014). Termomodernizacja zabytkowych kościołów. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 5, Nr 1, 23-29.

Wielgosiński G. (2009) Czy Biomasa jest paliwem ekologicznym? W: Monografii „Polska Inżynieria Środowiska pięć lat po wstąpieniu do Unii Europejskiej”. Tom. I. (red. J. Ozonek i M. Pawłowska). *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, Lublin, vol. 58, 347-356

Wskaźniki opałowe (2012). Wskaźniki opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2009 do raportowania w ramach Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2012.

Zwolski W. (2011a). Audyt energetyczny budynku kościoła parafii rzymsko-katolickiej w Chłopkowie. *Pracownia Obsługi i Inwestycji Waldemar Zwolski*, Warszawa.

Zwolski W. (2011b). Audyt energetyczny budynku kościoła parafii rzymsko-katolickiej w Serpelicach. *Pracownia Obsługi i Inwestycji Waldemar Zwolski*, Warszawa.

Zwolski W. (2011c). Audyt energetyczny budynku kościoła parafii rzymsko-katolickiej w Kozuchówku. *Pracownia Obsługi i Inwestycji Waldemar Zwolski*, Warszawa.

REDUCTION OF EMISSION POLLUTION AS A RESULT OF THERMOMODERNISATION HISTORIC SACRAL BUILDINGS

Abstract: The paper presents the environmental effect that can be achieved after thermomodernisation based on energy audits carried out in historic sacra buildings. Four church were analysed, all of them were located in the are of the Drohiczyn Diocese.

TRÓJOSIOWE OBCIĄŻENIA CYKLICZNE PODŁOŻA GRUNTOWEGO W BUDOWNICTWIE DROGOWYM

Wojciech SAS*, Andrzej GŁUCHOWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

Streszczenie: Wzrost inwestycji drogowych w Polsce wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na materiały budowlane i z poszukiwaniem alternatywnych metod wykonania konstrukcji drogowej. Wraz z rozwojem budownictwa drogowego obserwuje się zwiększenie natężenia ruchu drogowego. Istotnym odsetkiem pojazdów drogowych są samochody dostawcze, których liczba rośnie wraz z rozwojem transportu. Ciężkie samochody mogą przewozić ograniczoną ilość towaru, ze względu na obciążenie osi pojazdu. Może się okazać, że wkrótce trzeba będzie dostosować drogi ekspresowe i autostrady do zwiększonego obciążenia osi. Dotychczasowe badania empiryczne oraz Katalog typowych nawierzchni półsztywnych i sztywnych będą w związku z tą sytuacją zastąpione lub aktualizowane. W artykule przedstawiono weryfikację własnych badań nad obciążeniami cyklicznymi gruntów według PN-EN 13286-7 (2004).

Słowa kluczowe: obciążenia cykliczne, teoria dostosowania, cykliczne badania trójosiowe, mieszanki niezwiązane.

1. Wstęp

W pracy Bonda i Harrisa (2008) zaznaczono, że Eurokod 7 (PN-EN 1997-2:2009 *Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne - Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego*) nie zajmuje się tematyką obciążeń cyklicznych. Jednak to obciążenia cykliczne są w mechanice materiałów powodem zmęczenia materiału, któremu grunt także podlega. Brak jest jednak odpowiednich norm, które systematyzowałyby badania oraz ich interpretację dla celów drogowych oraz posadowień innych budowli obciążonych cyklicznie, takich jak: morskie turbiny wiatrowe, konstrukcje portowe, fundamenty obciążane mimośrodem (Randolph i Gouvernec, 2011).

Projektowanie konstrukcji drogowych na przestrzeni lat zmieniło swoje podejście z empirycznego (na przykład metoda PJ-ITB) na mechanistyczno-empiryczne, które w procesie projektowania uwzględniło dodatkowe parametry geotechniczne w postaci modułu Younga E oraz współczynnika Poissona ν . Owe właściwości można określać w laboratorium oraz *in situ* za pomocą płyty sztywnej (Piłat i Radziszewski, 2004). Metoda mechanistyczna, wykorzystuje w projektowaniu elementy teorii sprężystości i zakłada, że podbudowa drogowa jest ciałem sprężysto-idealnie plastycznym, które w wyniku obciążenia zachowuje się sprężysto do granicznej wartości obciążenia, gdy następuje utrata właściwości mechanicznych materiału i jego zniszczenie (Ullidtz i Peattie, 1980).

Obserwacje przeprowadzone przez badaczy zajmujących się obciążeniami cyklicznymi przedstawiają obraz problemu powtarzalnego obciążania gruntu. Pomimo, iż grunt podlega naprężeniu ściskającemu, które nie przekroczyło dopuszczalnej wartości naprężenia oznaczającego zniszczenie materiału, występują w nim odkształcenia plastyczne. Odkształcenia plastyczne mogą doprowadzić do powstania jednego z dwóch stanów granicznych określonych w sposób następujący (Piłat i Radziszewski, 2004):

- wartość modułu sztywności G stanowi mniej niż 50% wartości początkowej tego modułu,
- spękania zmęczeniowe nawierzchni asfaltowej o szerokości rozwarcia rys równej 2 mm stanowią co najmniej 20% powierzchni nawierzchni.

Kryteria te są uzależnione od pracy wszystkich warstw konstrukcyjnych drogi, przez co jakość każdej warstwy należy zaprojektować i dostosować do warunków eksploatacji.

Przyjęte dla podbudów niezwiązanych kryteria w świetle empiryczno-mechanistycznego podejścia projektowego nie uwzględniają powstania odkształceń plastycznych we wszystkich warstwach konstrukcji i podłożu gruntowym, które w ujęciu inżynierskim są nazywane koleinami.

Obciążenia cykliczne powodują w gruncie nienasyconym wzrost modułu sprężystości. Ma to związek z plastycznym wzmocnieniem gruntu, który w wyniku kolejnych cykli działania tego samego naprężenia odpowiada zmniejszaniem się odkształceń plastycznych a zwiększeniem się odkształceń sprężystych (Araya, 2011;

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: wojciech_sas@sggw.pl

Sas i Głuchowski, 2013). W celu scharakteryzowania tego zjawiska wprowadzono cykliczny moduł sprężystości gruntu, nazywany „resilient modulus” a oznaczany jako M_r (często w literaturze polskiej oznaczany również jako M_R). Definicja tego modułu określona jest jako stosunek amplitudy naprężenia $\Delta\sigma_p$ w danym cyklu do odkształcenia sprężystego ε_r gruntu (O'Reilly i Brown, 1991):

$$M_r = \frac{\Delta\sigma_p}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Norma PN-EN 13286-7:2004 *Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 7: Próba cyklicznego obciążania trójosiowego mieszanek niezwiązanych* definiuje cykliczny moduł sprężystości jako E_r w warunkach stałego mniejszego naprężenia głównego $\sigma_3 = 0$ jako iloraz przedstawiony w równaniu (1), oznaczając składowe w inny sposób:

$$E_r = \frac{\sigma_1^r}{\varepsilon_1^r} \quad (2)$$

gdzie: $\sigma_1^r = \sigma_{1max} - \sigma_{1min}$ jest amplitudą naprężenia w N-tym cyklu, a $\varepsilon_1^r = L_r(N) / L_0$ jest odkształceniem sprężystym w N-tym cyklu wyrażonym jako stosunek zmiany wysokości próbki $L_r(N)$ w cyklu N do początkowej wysokości próbki L_0 przed badaniem. Wartość cyklicznego modułu sprężystości w artykule dalej będzie oznaczana jako M_r . Określenie wartości cyklicznego modułu sprężystości M_r jest potrzebne w przypadku budownictwa drogowego, ze względu na charakterystykę mechaniczną gruntu na zadane obciążenia od poruszającego się pojazdu.

Obciążenia cykliczne charakteryzuje częstotliwość od 0 do 1 Hz, występują wtedy odkształcenia plastyczne, a siły bezwładności są zaniedbywalne (Peralta i Achmus, 2010).

Obciążenia cykliczne będące powodem powstawania kolein w gruncie z punktu widzenia mechaniki gruntu są odkształceniami plastycznymi. Badania gruntów niespoistych doprowadziły do odkrycia zmiennego zachowania się gruntu przy różnych poziomach naprężenia (Goldscheider, 1977; Werkmeister i in., 2001). Tego typu odpowiedź materiału na obciążenie cykliczne opisuje teoria dostosowania (*shakedown theory*). Dla materiału sprężysto-idealnie plastycznego istnieje pięć możliwych odpowiedzi na zadane obciążenie cykliczne (Werkmeister i in., 2001):

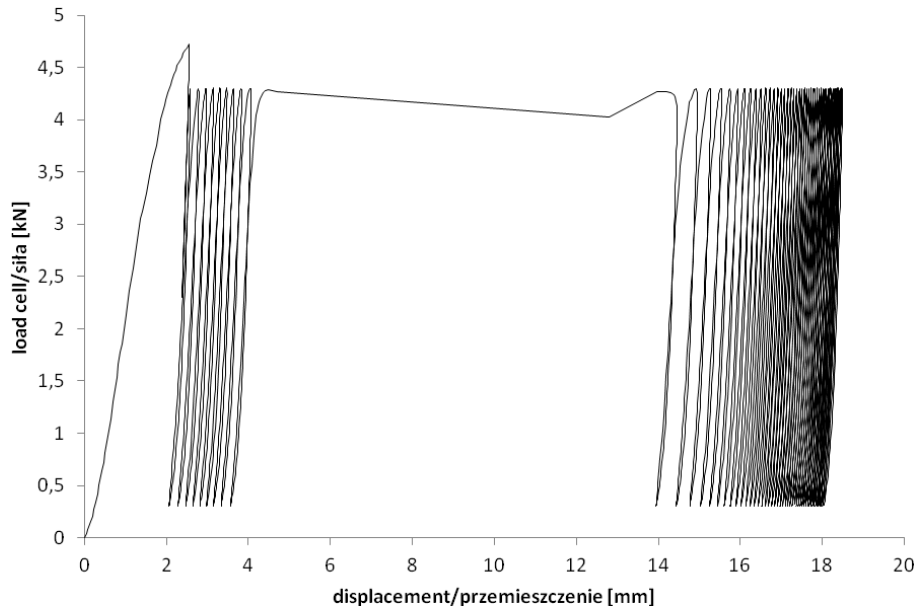
1. Odpowiedź sprężysta, przy obciążeniu cyklicznym mniejszym niż granica sprężystości – wtedy odkształcenia plastyczne przy obciążeniu cyklicznym nie pojawiają się w żadnym cyklu.
2. Klasyczne zniszczenie – w wyniku wysokiej amplitudy naprężenia cyklicznego nośność gruntu zostaje przekroczona a zniszczenie następuje natychmiast w wyniku przyrostu nadmiernych odkształceń plastycznych.
3. Zniszczenie w wyniku zmęczenia zachodzi podczas cyklicznego obciążenia materiału amplitudą mniejszą

niż w przypadku 2, a przyrost odkształceń plastycznych w każdym cyklu ma znak dodatni (obciążenie klasyczne) i nigdy nie wygasa; w wyniku zjawiska przyrostu nieskończenie dużej liczby odkształceń plastycznych materiałów po odpowiednio dużej liczbie cykli przekracza stan graniczny przydatności do użytkowania.

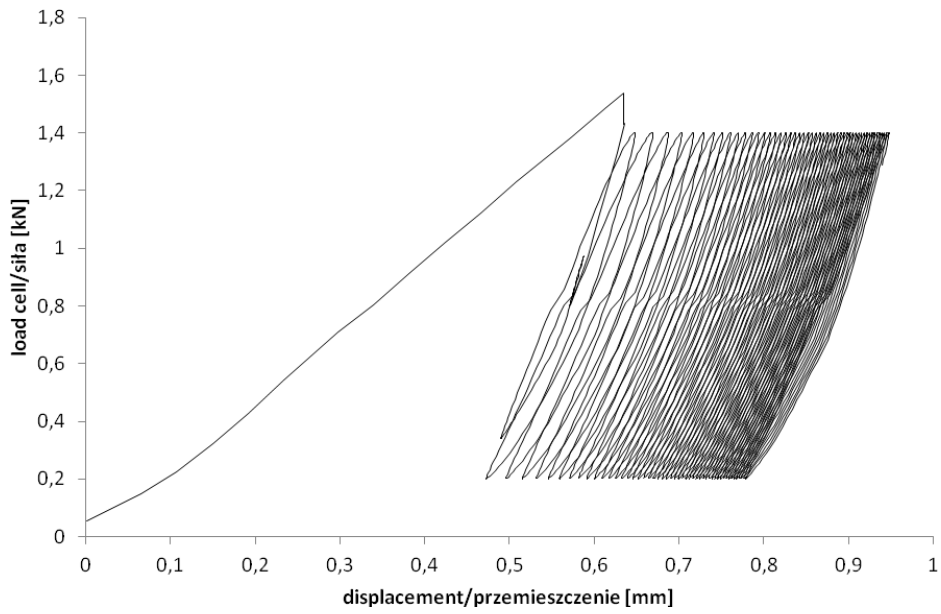
4. Alternatywna plastyczność – powstaje w wyniku cyklicznego obciążania materiału jak w przypadku 3, jednak przyrost odkształceń plastycznych zmienia znak (ściskanie i rozciąganie). Alternatywna plastyczność zachodzi wówczas, gdy przyrost odkształceń plastycznych przy ściskaniu (+) zostanie zmniejszony bądź wyrównany przez przyrost odkształceń plastycznych przy rozciąganiu (-). Termin alternatywna plastyczność odnosi się do zjawiska, gdy pomimo bardzo małego (lub braku) przyrostu odkształceń plastycznych materiał ulega zjawisku uplastycznienia zarówno podczas ściskania, jak i rozciągania. Cykliczny moduł sprężystości przy kolejnych cyklach obciążenia nie jest stały, a praca plastyczna gruntu wzrasta wraz z kolejnymi cyklami, co może doprowadzić do zniszczenia w wyniku zmęczenia.
5. Dostosowanie, ostatnia możliwa odpowiedź materiału na obciążenia cykliczne, zachodzi przy niższych amplitudach naprężenia cyklicznego niż w punktach 2, 3, 4. Początkowo dochodzi do powstania odkształceń plastycznych, lecz ich przyrost w czasie kolejnych cykli jest coraz mniejszy, co prowadzi do stabilizacji materiału poprzez zanik odkształceń plastycznych a odpowiedź na zadaną amplitudę jest sprężysta. Ważną cechą tego zjawiska są resztkowe naprężenia wewnątrz materiału, które wyrównują się wzajemnie i są stałe w kolejnych cyklach po wygaśnięciu odkształceń plastycznych.

Na podstawie powyższej teorii, dokonano analizy odpowiedzi gruntu na zadaną amplitudę obciążeń cyklicznych. Rysunki 1, 2 i 3 przedstawiają teorię dostosowania dla różnych gruntów. Są to wykresy otrzymane z badania dla różnych gruntów (Głuchowski, 2014; Sas i in., 2012). Badania zostały wykonane przy pomocy cyklicznego aparatu trójosiowego oraz maszyny do jednoosiowego ściskania. Aparatura do badań trójosiowych określa przed badaniem sztywność gruntu w celu wykonania dalszych etapów badań. Charakterystyczne piki w pierwszym cyklu na rysunkach 1 i 2 są wynikiem tego procesu.

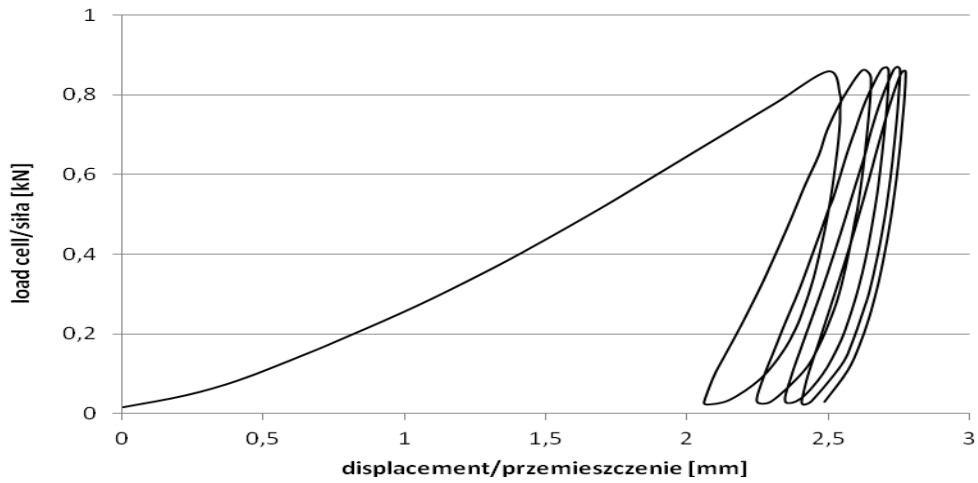
Rysunek 1 przedstawia przykład utraty nośności gruntu określony jako przypadek 2 oraz 3. Grunt obciążony został nadmierną amplitudą siły, która spowodowała powstanie nadmiernych odkształceń plastycznych – w materiale w trakcie ośmiu cykli obciążenia doszło do utraty nośności gruntu. Na rysunku 2 przedstawiono odmienną charakterystykę – dla gruntu w warunkach wilgotności optymalnej i przy odpowiednio małej amplitudzie siły wraz z kolejnymi cyklami dochodzi do dostosowania się gruntu do działającego cyklicznie naprężenia. W tym przypadku grunt ma w zakresie działających naprężeń stały cykliczny



Rys. 1. Utrata nośności gruntu pod wpływem obciążeń cyklicznych (Głuchowski, 2014)



Rys. 2. Dostosowanie gruntu do cyklicznej amplitudy naprężeń (Głuchowski, 2014)



Rys. 3. Stabilizacja odkształceń plastycznych w gruncie

moduł sprężystości M_r , a przyrost odkształceń plastycznych zmniejsza się do zera. Rysunek 3 przedstawia proces stabilizacji odkształceń plastycznych (stopniowy spadek ich przyrostu). Ten przypadek obciążenia cyklicznego jest istotny ze względu na duży przyrost odkształceń plastycznych oraz wolne tempo ich wygaszania wraz z kolejnymi cyklami obciążenia. Jeśli grunt, w określonym zakresie naprężeń, będzie akumulował dużą liczbę przemieszczeń permanentnych, dojdzie do przekroczenia stanu granicznego użyteczności przed pojawieniem się zjawiska dostosowania.

Rysunek 4 ilustruje zjawiska różnej odpowiedzi gruntu na obciążenie cykliczne. Wykres przedstawia przyrost odkształceń plastycznych w kolejnych cyklach (Shajarati i in., 2012). To samo zjawisko przedstawia rysunek C.1 w normie PN-EN 13286-7 (2004).

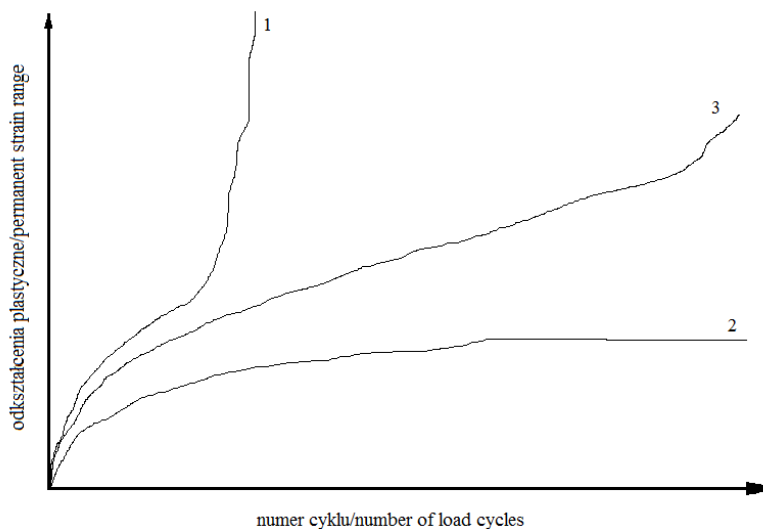
Celem pracy była prezentacja i analiza wyników badań cyklicznego trójosiowego ściskania próbki gruntu

spoiстого oraz porównanie z dotychczasową literaturą i normą PN-EN 13286-7 (2004).

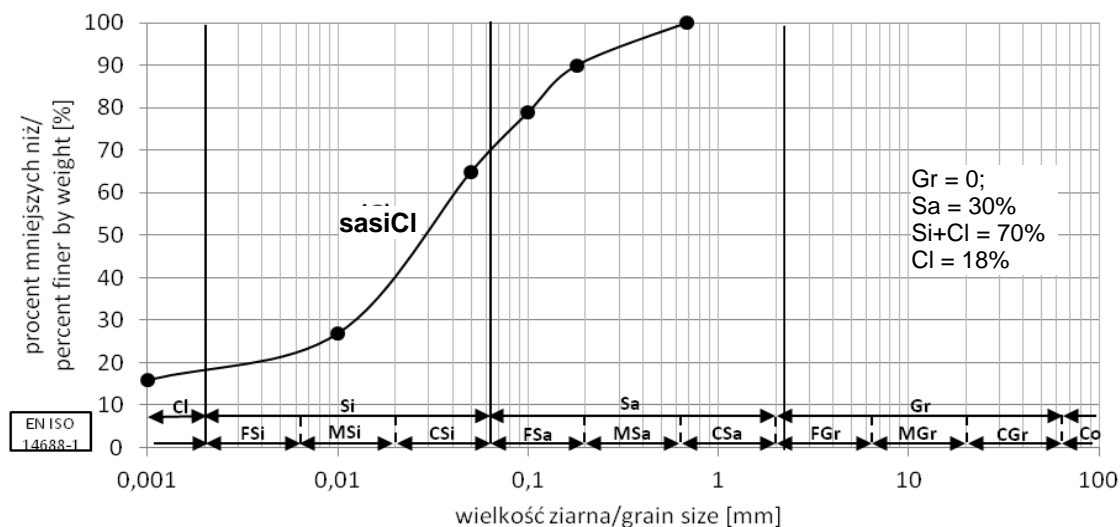
2. Materiały i metody

Materiałem użytym do badań był grunt spoisty, który pobrany został z placu budowy konstrukcji drogowej z głębokości 1,5 m. Na podstawie analizy sitowej według PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2009 *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Oznaczanie składu granulometrycznego* określono krzywą uziarnienia. Wynik analizy sitowej przedstawiono na rysunku 5. Grunt rozpoznano jako il z pyłem sasiCl zgodnie z PN-EN ISO 14688-2:2006 *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania*.

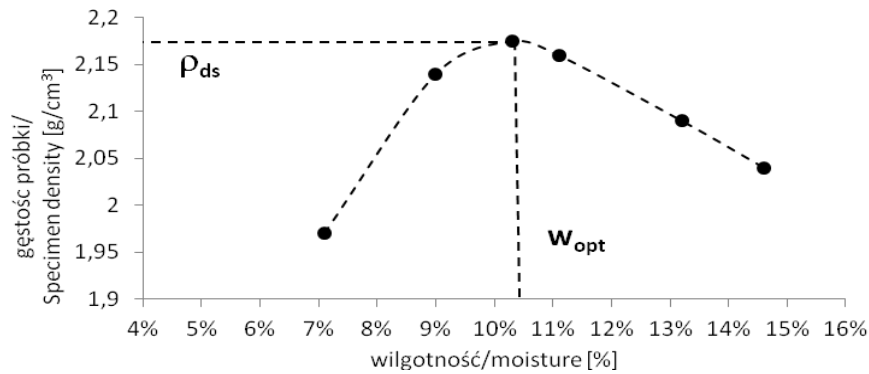
Ponadto wykonano badanie Proctora według PN-88/B-04481 *Grнты budowlane. Badania próbek gruntu* gdzie ustalono: wilgotność optymalną $w_{opt} = 10,4\%$, maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 2,18 \text{ g/cm}^3$. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 4. Schemat odpowiedzi gruntu na obciążenie cykliczne (PN-EN 13286-7:2004):
1 – stopniowa utrata nośności, 2 – dostosowanie, 3 – stabilizacja



Rys. 5. Krzywa uziarnienia badanego gruntu



Rys. 6. Wyniki badań gruntu standardową metodą Proctora

Badanie przeprowadzono w cyklicznym aparacie trójosiowym. W pracy przedstawiono wyniki badań dwóch próbek gruntu siCl zagęszczonego metodą Proctora przy wilgotności optymalnej. Następnie z próbki zagęszczonego gruntu spoistego został wycięty walec o wymiarach charakterystycznych: średnica $d = 7$ cm, wysokość $h = 14$ cm (smukłość próbki równa 2) i umieszczony w komorze aparatu trójosiowego ściskania. Po etapach nasączenia (parametr Skemptona $B > 0,90$) przeprowadzono konsolidację próbki pod naprężeniem 275 kPa (badanie 1) oraz 210 kPa (badanie 2). Obie próbki były obciążone siłą 0,1 kN przez 100 cykli. Amplituda działającej siły wynosiła 0,01 kN a częstotliwość obciążania 0,1 Hz. Badanie wykonano w warunkach bez odpływu. Celem badania miało być symulowanie szybkiego przyrostu cyklicznego obciążenia, gdy możliwa odpowiedź gruntu poprzez rozproszenie nadwyżki ciśnienia w porach nie była możliwa.

3. Wyniki badań i analiza wyników

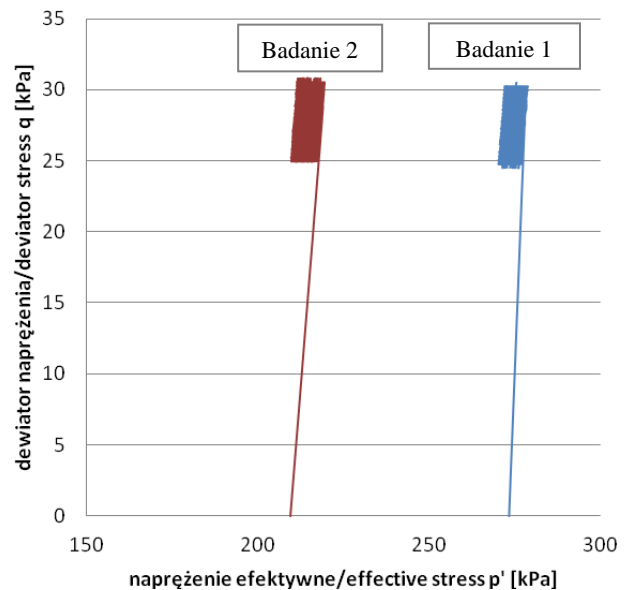
Na rysunkach 7, 8, 9, 10 przedstawiono wyniki badań. Na rysunku 7 pokazano przebieg badania – na osi poziomej zaznaczono naprężenie efektywne $p' = 1/3(\sigma'_1 + \sigma'_3)$, a na osi pionowej dewiator naprężenia $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$.

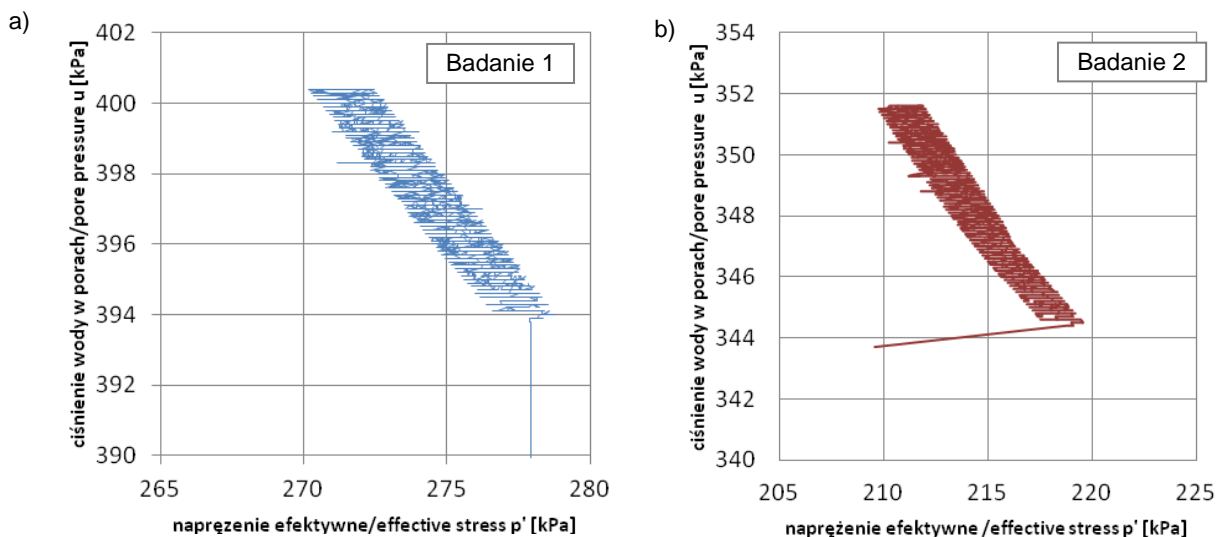
Badanie wykonane w warunkach bez odpływu charakteryzuje się ścieżką naprężenia, w której naprężenie efektywne p' spada wraz z kolejnymi cyklami obciążenia. Jest to spowodowane zwiększaniem się ciśnienia wody w porach, które przejmuje część działającego na próbkę cyklicznie dewiatora naprężenia q . W badaniu 1 i 2 również zaobserwowano to zjawisko, niemniej jednak wzrost ten nie jest ograniczony i nie doprowadził do zniszczenia próbki po 100 cyklach. Odpowiedź gruntu w postaci wzrostu ciśnienia porowego została przedstawiona na rysunku 8. Wzrost ciśnienia porowego spowodowany był przejmowaniem przez wodę w porach gruntu naprężenia pionowego. Po 100 cyklach ciśnienie porowe wzrosło w przypadku badania 1 o 6,5 kPa, a w przypadku badania 2 o 7,0 kPa.

Rysunki 9 i 10 przedstawiają zmianę odkształcenia osiowego ε_1 w badaniu 1 i 2. Największy przyrost odkształcenia plastycznego zaobserwowano w przypadku pierwszego cyklu, gdy obciążenie pionowe zostało zadane po raz pierwszy. Odkształcenie w pierwszym cyklu

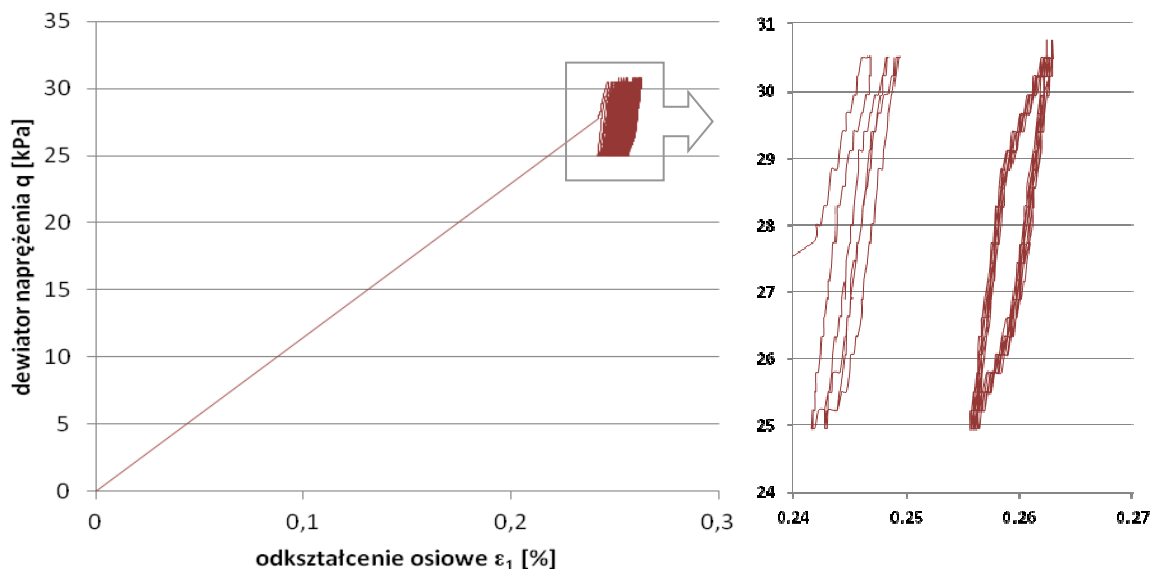
w badaniu 1 wynosiło 0,13% i w badaniu 2 0,24%, w setnym cyklu odkształcenie dla badania 1 wyniosło 0,14% a w badaniu 2 0,26%. Pomimo dwukrotnej różnicy wielkości odkształcenia, różnica w wartości ciśnienia porowego nie jest tak duża. Oznacza to, że grunt ulega nadal stopniowemu zagęszczeniu. Odkształcenia wywołane są poprzez działanie dewiatora naprężeń na szkielet gruntowy, który akumuluje odkształcenia. Wraz z kolejnymi cyklami obciążenia ciśnienie wody w porach tylko częściowo przejmuje wartość działającego dewiatora naprężenia. Grunt obciążony tym samym dewiatorem, ale znajdujący się pod wpływem innego naprężenia efektywnego, zachowuje się w przypadku zwiększenia nadwyżki ciśnienia wody w porach w ten sam sposób.

Rysunki 9 i 10 przedstawiają cykle 2 – 4 oraz cykle 90 – 100. Po wykonaniu pełnego badania, które obejmowało 100 cykli, odkształcenia były mniejsze niż te podane w normie PN-EN 13286-7:2004 czyli $\varepsilon_1^p \leq 0,25\%$, przy czym należy zaznaczyć że ε_1^p oznacza różnicę odkształceń plastycznych pomiędzy ostatnim a przedostatnim cyklem.

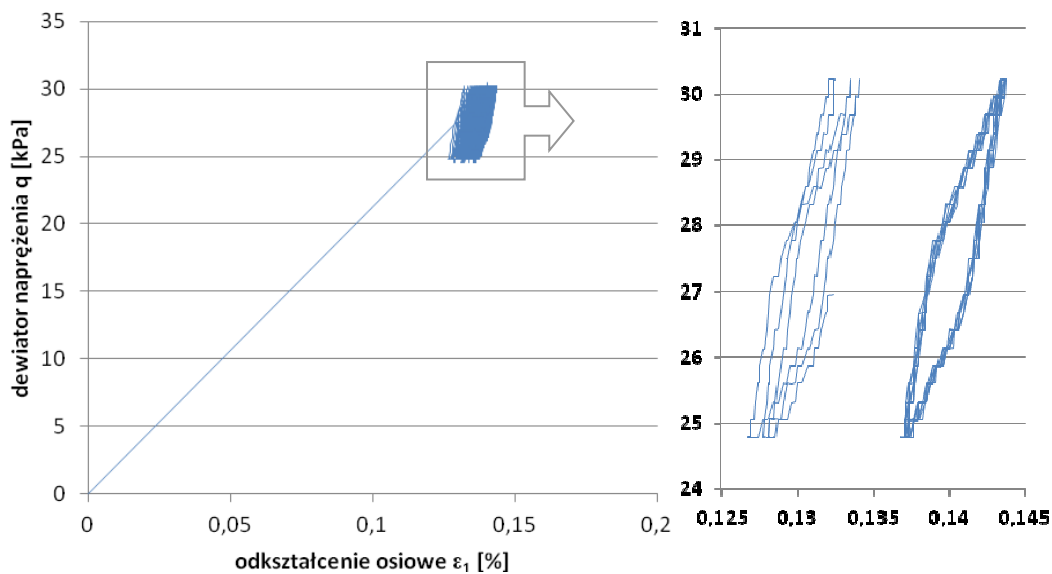
Rys. 7. Wyniki cyklicznego badania trójosiowego dla naprężenia: 1) $\sigma_3 = 210$ kPa, 2) $\sigma_3 = 275$ kPa



Rys. 8. Wykres zmiany ciśnienia porowego u i napężenia efektywnego p' a) w badaniu 1, b) w badaniu 2



Rys. 9. Wykres zmiany odkształcenia osiowego ε_1 do zmiany dewiatora napężenia q w badaniu 2



Rys. 10. Wykres zmiany odkształcenia osiowego ε_1 do zmiany dewiatora napężenia q w badaniu 1

Wykorzystując wzór (1) obliczono cykliczny moduł sprężystości M_r gruntu w badaniach 1 i 2. W przypadku naprężenia $\sigma_3 = 275$ kPa otrzymano wartość modułu $M_r = 83$ MPa, a dla $\sigma_3 = 210$ kPa – wartość $M_r = 5,6$ MPa. Tak duża różnica wartości M_r spowodowana jest większą wartością odkształceń sprężystych w badaniu 2. Oznacza to, że pomimo osiągnięcia przez materiał stanu dostosowania się, może on ulegać nadmiernym odkształceniom sprężystym. Należy to mieć na uwadze w trakcie procesu projektowania konstrukcji drogowej. Konstrukcje podatne opierają się na zasadzie pracy wszystkich warstw drogi, nadmierne odkształcenia powodować mogą nierównomierne rozłożenie naprężenia a przez to uplastycznienie się niektórych warstw konstrukcyjnych. W efekcie prowadzi to do zmniejszenia trwałości konstrukcji.

4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule wyniki badania cyklicznego trójosiowego ściskania i analiza literatury oraz normy PN-EN 13286-7:2004 pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badanie gruntu spoistego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 13286-7:2004, w świetle której grunt nie spełnia wymogów stawianych gruntem stanowiącym niezwiązaną podbudowę drogi. Badania te można traktować jako porównanie właściwości gruntów spoistych do wymogów stawianych gruntem budowlanym w celu podkreślenia niskich parametrów wytrzymałościowych i w celu zaprezentowania charakterystyki odkształceń.
2. Wykonano 100 cykli obciążenia o częstotliwości 0,1 Hz które spowodowały reakcję gruntu na zadane obciążenie cykliczne w postaci dostosowania się tego materiału do działającego dewiatora naprężeń zgodnie z teorią dostosowywania.
3. Przeprowadzone badania były badaniami CU; wzrost ciśnienia porowego występował wraz z kolejnymi cyklami, a jego przyrost w stosunku do naprężenia konsolidacji był mały i wynosił $\Delta u = 6,5$ kPa i 7 kPa dla naprężenia odpowiednio 275 kPa i 210 kPa.
4. Na podstawie wyników badań obliczono cykliczny moduł sprężystości M_r który wynosił odpowiednio 83 MPa i 5,6 MPa dla naprężenia konsolidacyjnego σ_3 równym 275 kPa i 210 kPa; są to wartości niskie, różniące się między sobą.
5. Wielkość odkształceń całkowitych gruntu spoistego normalnie skonsolidowanego zależy w dużej mierze od naprężenia konsolidacji. Ten sam grunt może dostosować się do działającego dewiatora, jednak wielkość odkształceń sprężystych będzie większa dla mniej skonsolidowanego gruntu, przez co odkształcenia gruntu w wyniku cyklicznie działającej siły będą większe.

Literatura

- Araya A.A. (2011). Integrating traditional characterization techniques in mechanistic pavement design approaches. W: *T&di congress 2011 integrated transportation and development for a better tomorrow, Al-qadi s.l. & Murrel S. (Eds.)*. Reston, USA, 596-606.
- Bond A., Harris A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. Taylor and Francis, London.
- Głuchowski A. (2014). Estimating of shakedown limit for cohesive soils under cyclic loading from cCBR test. *Wiedza i Eksperymenty w Budownictwie, Monografia*, 61-61.
- Goldscheider M. (1977). Shakedown and incremental collapse of structures in dry sand bodies. W: *Proceedings of Dynamical Methods in Soil and Rock, Plastic and Long-Term Effects in Soils*.
- O'Reilly M.P., Brown S.F. (1991). *Cyclic loading of soils*. Blackie and son, London.
- Peralta, P., Achmus, M. (2010). An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads. W: *Proceedings of 7th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*, Zurich, Switzerland.
- Piłat J., Radziszewski P. (2004). *Nawierzchnie asfaltowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Randolph M., Gouvernec S. (2011). *Offshore geotechnical engineering*. Spon Press, New York.
- Sas W., Głuchowski A., Szymański A. (2012). Determination of Resilient modulus MR for the lime stabilized Clay obtained from the repeated loading CBR test. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 44, 143-153.
- Sas W., Głuchowski A. (2013). Application of cyclic CBR test to approximation of subgrade displacement in road pavement. *Acta Scientiarum Polonorum-Architectura*, 12, 51-61.
- Shajarati A., Sorensen K.W., Nielsen S.K., Ibsen L.B. (2012). Behaviour of cohesionless soils during cyclic loading. *DCE Technical Memorandum*, 14, 1-8.
- Ullidtz P., Peattie K.R. (1980). Pavement analysis by programmable calculators. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 106.
- Werkmeister S., Dawson A.R., Wellner F. (2001). Permanent deformation behaviour of granular materials and the shakedown theory. *Journal of Transportation Research Board*, 1757, 75-81.

CYCLIC TRIAXIAL TESTS OF SUBGRADE SOILS IN ROAD CONSTRUCTION

Abstract: Increase of road infrastructure investments in Poland is related to increase of unbound material demand and therefore alternative methods of road design are developed. With growth of road constructions, increase of traffic is observed. Important percentage of all road traffic is heavy transport. Limits of transported capacity regulates maximum load capacity on vehicle axle. This situation results in development of new design guides and today Catalogue of Typical Pavement Structures will be updated or replaced. In this article verification of laboratory tests was confronted with European Code 13286-7 (2004).

Wydarzenia

Profesor Eugeniusz Dembicki Doktorem Honorowym Politechniki Białostockiej

W dniu 30 stycznia 2014 roku w Politechnice Białostockiej odbyła się uroczystość nadania najwyższej godności akademickiej – tytułu Doktora Honoris Causa – prof. zw. dr. hab. inż. Eugeniuszowi Dembickiemu, światowej sławy uczonemu w zakresie geotechniki, Doktorowi Honoris Causa Uniwersytetu J. Fouriera w Grenoble, Politechniki Wrocławskiej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie i Politechniki Łódzkiej.

„Serdecznie witam Pana Profesora w gronie społeczności akademickiej Politechniki Białostockiej i gorąco dziękuję za Pańską pracę i zaangażowanie, które wzbogaciły dorobek naszej Uczelni” – powiedział podczas powitania Rektor Politechniki Białostockiej prof. dr hab. inż. Lech Dzieńis. Bliska współpraca Profesora Eugeniusza Dembickiego z Wydziałem Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej sięga lat 70. XX wieku. Profesor był promotorem trzech rozpraw doktorskich pracowników Politechniki Białostockiej. Był recenzentem w dwóch przewodach habilitacyjnych i recenzentem wydawniczym dwóch innych rozpraw habilitacyjnych, a także recenzentem trzech rozpraw doktorskich obronionych na WBiIŚ. Recenzował wnioski awansowe oraz liczne publikacje i doniesienia konferencyjne pracowników Wydziału, a w latach 2001-2006 brał udział w realizacji dwóch projektów naukowo-badawczych KBN. Profesor E. Dembicki współorganizował wraz z pracownikami Zakładu Geotechniki Politechniki Białostockiej renomowane konferencje krajowe, będąc często przewodniczącym ich komitetów naukowych.

Prowadząca uroczystość Dziekan Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska prof. dr hab. inż. Józefa Wiater przybliżyła procedurę nadania tytułu doktora honoris causa. W swoim wystąpieniu przytoczyła słowa recenzji, których autorami byli: prof. dr. hab. inż. Alojzy Szymański – Rektor Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, prof. dr hab. inż. Cezary Madryas – Prorektor ds. Rozwoju Politechniki Wrocławskiej oraz prof. dr hab. inż. Jan Ślusarek – Dziekan Wydziału Budownictwa w Politechnice Śląskiej. Recenzenci podkreślili bogaty dorobek naukowy Profesora i znaczący dorobek w kształceniu i rozwoju kadry naukowej oraz niepodważalne zasługi dla rozwoju i organizacji nauki polskiej. Profesor Alojzy Szymański w podsumowaniu swojej recenzji stwierdza „Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Dembicki należy bez wątpienia do największych postaci współczesnego świata nauki. /.../Wielka wiedza i dorobek naukowy, niecodzienna kultura osobista, dynamizm działania, wyjątkowa trafność decyzji podejmowanych w perspektywie stojących przed nauką wyzwania są wzorcem godnym do naśladowania przez wszystkich, którzy odpowiadają za zarządzanie dużymi organizmami społecznymi.” Profesor Cezary Madryas, omawiając osiągnięcia profesora Eugeniusza Dembickiego, konstatuje: „można śmiało stwierdzić, że jest On promotorem większej części polskiego środowiska geotechników, a także

wpłynął znacząco na ukształtowanie tego środowiska poza granicami naszego kraju. Stworzona przez Kandydata szkoła naukowa i siła jej oddziaływania wychodzi znacznie poza obszar Polski, co zostało mocno zauważone w kraju i poza jego granicami, i przełożyło się na liczne nagrody wyróżnienia, godności akademickie oraz państwowe”. Profesor Jan Ślusarek kończy swoją recenzję słowami: „Biorąc pod uwagę wszystkie osiągnięcia Kandydata mogę z pełnym przekonaniem poprzeć wnioski o nadanie tytułu doktora honoris causa Politechniki Białostockiej Panu Profesorowi Eugeniuszowi Dembickiemu. Nadanie tego Tytułu będzie zaszczytem nie tylko dla Profesora, ale również wyróżnieniem dla Politechniki Białostockiej”.

Laudację na cześć Profesora Eugeniusza Dembickiego wygłosiła promotor – dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska, prof. nzw. Promotor podkreśliła, że Profesor jest niekłamanym autorytetem naukowym i jedną z najbardziej znaczących osobistości światowej geotechniki. Cytując słowa laudacji: „Profesor Eugeniusz Dembicki całe swoje życie podporządkował rozstawionej przez Kanta maksymie Horacego – *Odważ się być mądrym*”. Profesor Eugeniusz Dembicki jest autorem bądź współautorem około 600. publikacji, w tym: 25. książek i skryptów opublikowanych w Polsce, Francji, Australii, Belgii, Rosji, Chorwacji i Chinach, około 230. monografii, studiów i rozpraw, a także ponad 170. artykułów recenzowanych i komunikatów naukowych oraz 190. artykułów i recenzji drukowanych. Profesor E. Dembicki swoje życie naukowe związał z Politechniką Gdańską, w której ponad 30 lat kierował Katedrą Geotechniki, był Dziekanem, a w latach 1984-87 – Rektorem swojej Uczelni, przewodnicząc jednocześnie Kolegium Rektorów Uczelni Wybrzeża Gdańskiego. Przez 10 lat kierował też Katedrą Geotechniki na Wydziale Nauk Technicznych w Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. O sile nauczania Profesora, będącej według Arystotelesa „jedyną i wyłączną miarą posiadania przez człowieka gruntownej wiedzy” świadczy Jego imponujący dorobek w kształceniu i rozwoju kadry naukowej. Pełnił funkcję promotora w 28. przewodach doktorskich, był recenzentem 74. prac doktorskich i 41. prac habilitacyjnych, a także recenzentem 28. wniosków o nadanie tytułu naukowego profesora, 10. wniosków o nadanie tytułu naukowego profesora zwyczajnego i 7. wniosków o powołanie na stanowisko profesora zwyczajnego. Opracował także sześć recenzji o nadanie godności Doktora Honoris Causa Politechnik: Gdańskiej, Krakowskiej, Łódzkiej i Warszawskiej. Profesor E. Dembicki wykładał na uczelniach polskich – Politechnice Gdańskiej i Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim, ale także jako profesor nominowany w pięciu uniwersytetach francuskich: w Grenoble, Rouen, Nantes, Lyonie i w Poitiers oraz jako profesor mianowany: na Uniwersytecie w Zagrzebiu, na niemieckim uniwersytecie w Kassel, na Politechnice w Turynie oraz w Australii na Uniwersytecie w Wollongong. Prowadził także





wykłady na indywidualne zaproszenia w 15. uniwersytetach zagranicznych. Profesor piastował wiele szacownych funkcji, ale jako najważniejsze dla rozwoju środowiska polskiej geotechniki należy wymienić tu sprawowanie funkcji Prezydenta Polskiego Komitetu Geotechniki i jednocześnie członka Prezydium International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering w latach 1993–2002, a od roku 2002 – Honorowego Prezydenta Polskiego Komitetu Geotechniki. Pan Profesor E. Dembicki, w uznaniu swoich zasług, otrzymał szereg krajowych i zagranicznych odznaczeń i nagród. Do najważniejszych polskich odznaczeń należą: Medal Komisji Edukacji Narodowej, Krzyże: Kawalerski, Oficerski i Komandorski Orderu Odrodzenia Polski. Profesor jest Kawalerem i Komandorem Francuskich Palm Akademickich oraz Kawalerem i Oficerem Francuskiej Legii Honorowej, a także Oficerem Narodowego Orderu Zasługi Republiki Francuskiej. Został uhonorowany, między innymi, Nagrodą Naukową Maxa Plancka, Wielkim Złotym Medalem Honorowym Austriackiego Stowarzyszenia Inżynierów i Architektów oraz Nagrodą Międzynarodowego Komitetu Wielkich Sieni Elektrycznych CIGRÉ. Prof. K. Zabielska-Adamska podkreśliła wkład Profesora w budowę zespołu geotechników w Politechnice Białostockiej, a w podsumowaniu stwierdziła: „Profesor Eugeniusz Dembicki należy bez wątpienia

do największych postaci współczesnego świata nauki, a Jego rola w rozwoju i organizacji nauki jest nieoceniona. Jest przy tym szeroko znany ze swojej otwartości i życzliwości, kultury osobistej i wysokiej etyki”.

Profesor Eugeniusz Dembicki w okolicznościowym wystąpieniu przybliżył uczestnikom uroczystości swoją tematykę badawczą i ekspercką, a także działalność wydawniczą. Profesor przedstawił, między innymi, owoce swojej praktycznej działalności inżynierskiej, jako konsultant, autor i współautor ekspertyz i koncepcji rozwiązań: pierwszego suchego doku w Stoczni Gdynia, ścian szczelinowych przy budowie hali walcowni blach grubych w Hucie Częstochowa w latach 60-tych ubiegłego wieku, zagęszczania metodą mikrowybuchów narefulewanego podłoża piaszczystego pod posadowienie pełnomorskiego falochronu skrzyniowego w Porcie Północnym w Gdańsku czy koncepcji poszerzenia Półwyspu Helskiego we Władysławowie. Profesor wspominał też o studium wykonalności przekopu przez Mierzę Wiślaną w Skowronkach oraz przebudowy Dworca Centralnego w Warszawie, posadowieniach apartamentowca Sea Towers w Gdyni, pylonu Mostu w Rędzinie na obwodnicy Wrocławia oraz obiektów i tunelu Centrum Sopot w Sopocie, a także koncepcji budowy nowego głębokowodnego portu pod nazwą Port Westerplatte w Gdańsku. Na zakończenie Profesor nadmienił, że ważnym elementem Jego działalności było nie tylko pozostawienie po sobie następców, ale i wykształcenie kadry naukowej dla innych ośrodków naukowych. Z satysfakcją stwierdził, że doczekał się już „wnuków” naukowych, a spora liczba Jego doktorantów jest już profesorami w Polsce i za granicą.

Podczas uroczystości Doktor Honorowy odebrał liczne gratulacje. Wśród gości, którzy wystąpili z wyrazami szacunku i uznania byli: Wicewojewoda Podlaski Wojciech Dzierżowski, Rektor SGGW prof. Alojzy Szymański, Prorektor ds. nauki Politechniki Gdańskiej prof. Józef Sienkiewicz, Prezydent Polskiego Komitetu Geotechniki prof. Zbigniew Lechowicz oraz Sekretarz Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN prof. Anna Siemińska-Lewandowska. Odczytane zostały listy gratulacyjne nadesłane przez Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego prof. Lenę Kolarską-Bobińską, Prezesa Polskiej Akademii Nauk prof. Michała Kleibera, rektorów wyższych uczelni i prezesów stowarzyszeń naukowych. Profesor Eugeniusz Dembicki przez długi czas po uroczystości odbierał gratulacje od rodziny, przyjaciół i współpracowników oraz pracowników naukowych z wielu uczelni przybyłych na uroczystość.

**Dr hab. inż. Katarzyna ZABIELSKA-ADAMSKA,
prof. nzw.
Politechnika Białostocka**

Abstracts Vol. 5 No. 2

**Aleksander KIRYLUK, Jacek LESZCZYŃSKI, Adam ŁUKOWSKI, Rafał MIŁASZEWSKI,
Janina PIEKUTIN, Anna SIEMIENIUK, Elżbieta SKORBIŁOWICZ, Mirosław SKORBIŁOWICZ,
Joanna SZCZYKOWSKA, Józefa WIATER, Elżbieta ŻEBRANOWICZ**
Sources of surface water pollution and some methods of treatment

The aim of this study was to identify sources of pollution of surface water and some pollutant removal methods. Surface waters are contaminated by substances migrating from the soil and by surface flow and subsurface flow. There are other sources such as transport, land melioration, etc. One of the method of ammonium ion removal from the water is ion-exchange method using basaltic rock-mantle. However oil-related compounds can be effectively removed by ultrafiltration.

Jarosław KRAŻELEWSKI, Olgierd PUŁA
Deep excavation support system inside the Centennial Hall in Wrocław

The Centennial Hall (Hala Stulecia) is a structure which was included in the cultural and natural heritage of UNESCO as a pioneer achievement of the 20th-century engineering and architecture. The main task of the last modernization of the Centennial Hall was deepening the flooring in the central part of the entertainment arena to -4.80 m in order to implement a moving floor supported on hydraulic cylinders. The groundwater level was about 2.5 m below the flooring. Cohesive soil was located at the depth of 14 m below the flooring. Cut off wall was necessary to be positioned to the depth of about 15 m, and height limitations were 12 m. DSM and Jet Grouting columns were recommended to meet the General Contractor requirements: short task execution, construction of a cut-off wall ensuring the maximum sealing at the passage through the boulder clay layer, and low-cost implementation.

Anna OSTROWSKA-BUĆKO
Wind energy utilisation based on small vertical axis wind turbines

The purpose of this paper is to characterise the wind energy and to describe its conversion into electric energy. The article presents two design variants for wind energy conversion which are vertical axis wind turbine and horizontal axis wind turbine, pointing out their advantages and disadvantages. Furthermore the climatic conditions in Poland were analysed, regarding wind resources and possible locations of wind turbines. As a result of analyses the vertical axis wind turbine was appointed as the solution which is more suitable for Polish region, allowing for better and wider utilisation of wind energy (in comparison to the other design). The power obtained this way is used as a support for existing individual light and heating systems, and improves local energy security.

Joanna PIOTROWSKA-WORONIAK, Grzegorz WORONIAK
Reduction of emission pollution as a result of thermomodernisation historic sacral buildings

The paper presents the environmental effect that can be archived after thermomodernisation based on energy audits carried out in historic sacra buildings. Four church were analysed, all of them were located in the are of the Drohiczyn Diocese.

Wojciech SAS, Andrzej GŁUCHOWSKI
Cyclic triaxial tests of subgrade soils in road construction

Increase of road infrastructure investments in Poland is related to increase of unbound material demand and therefore alternative methods of road design are developed. With growth of road constructions, increase of traffic is observed. Important percentage of all road traffic is heavy transport. Limits of transported capacity regulates maximum load capacity on vehicle axle. This situation results in development of new design guides and today Catalogue of Typical Pavement Structures will be updated or replaced. In this article verification of laboratory tests was confronted with European Code 13286-7 (2004).