

AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE**

**PROJEKT PLANU REMEDIACJI SKŁADOWISKA ODPADÓW
PRZEMYSŁOWYCH „ZIELONA” NA TERENIE DAWNYCH
ZAKŁADÓW CHEMICZNYCH „ZACHEM” S.A.
W BYDGOSZCZY ORAZ REMEDIACJI ŚRODOWISKA
GRUNTOWO-WODNEGO W OBSZARZE ODDZIAŁYWANIA
SKŁADOWISKA
-ETAP III-**



**Wojewódzki Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej
w Toruniu**

Dofinansowano ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Toruniu

Kraków, czerwiec 2017

Wykonawcy:

PROJEKTU PLANU REMEDIACJI SKŁADOWISKA
ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH „ZIELONA” NA TERENIE
DAWNYCH ZAKŁADÓW CHEMICZNYCH „ZACHEM” S.A.
W BYDGOSZCZY ORAZ REMEDIACJI ŚRODOWISKA
GRUNTOWO-WODNEGO W OBSZARZE
ODDZIAŁYWANIA SKŁADOWISKA
-ETAP III-



.....
Kierownik projektu
dr hab. inż. Mariusz Czop



.....
dr inż. Dorota Pierri



Wykonano na zlecenie Regionalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska w Bydgoszczy

Spis treści

SŁOWNIK UŻYWANYCH TERMINÓW	6
1. WPROWADZENIE	9
2. IDENTYFIKACJA OBSZARU WYMAGAJĄCEGO PRZEPROWADZENIA REMEDIACJI	10
3. ZAGOSPODAROWANIE I SPOSÓB UŻYTKOWANIA TERENU	15
3.1. Historia użytkowania terenu	15
3.2. Stan aktualny	17
3.3. Uwarunkowania przyrodnicze	19
3.4. Zamierzenia planistyczne	22
4. SZCZEGÓŁOWA CHARAKTERYSTYKA OBSZARU WYMAGAJĄCEGO PRZEPROWADZENIA REMEDIACJI	23
4.1. Morfologia powierzchni terenu	23
4.2. Warunki klimatyczne i meteorologiczne	23
4.3. Sieć hydrograficzna i zbiorniki powierzchniowe	24
4.4. Gleby i grunty	25
5. BUDOWA GEOLOGICZNA	26
5.1. Litologia i stratygrafia	26
5.1.1. Utwory mezozoiczne	26
5.1.2. Paleogen	26
5.1.3. Neogen	26
5.1.4. Czwartorzęd	27
5.2. Tektonika	29
6. WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE	34
6.1. Czwartorzędowe piętro wodonośne	34
6.2. Neogeńskie piętro wodonośne	35
6.3. Kredowe piętro wodonośne	35
6.3.1. Warunki występowania i przepływu wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	36
6.4. Hydrogeologiczny model numeryczny rejonu dawnych ZCh „Zachem”	40
6.4.1. Konceptualny model hydrogeologiczny rejonu składowiska „Zielona”	40
6.4.2. Struktura modelu numerycznego	42
6.4.3. Wyniki badań modelowych	45

7. WARUNKI GEOLOGICZNO – INŻYNIERSKIE I GEOTECHNICZNE	48
8. IDENTYFIKACJA SUBSTANCJI ZANIECZYSZCZAJĄCYCH.....	49
8.1. Substancje nieorganiczne	49
8.2. Substancje organiczne	50
8.3. Szczegółowa charakterystyka wybranych potencjalnych substancji zanieczyszczających	51
8.3.1. Fenol	51
8.3.2. Chlorofenole	53
8.3.3. Pak pofenolowy	54
8.3.4. Siarczyn sodu	55
8.3.5. Glikole	55
8.3.6. Barwniki i półprodukty barwnikarskie.....	56
9. AKTUALNY STAN ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA NA OBSZARZE WYMAGAJĄCYM PRZEPROWADZENIE REMEDIACJI	58
9.1. Wody podziemne	58
9.1.1. Wyniki badań składu chemicznego wód podziemnych.....	58
9.1.2. Model numeryczny migracji zanieczyszczeń.....	63
9.1.3. Zasięg chmury zanieczyszczeń	64
9.2. Wody powierzchniowe.....	67
9.3. Gleby i grunty	68
9.4. Flora i fauna	70
10. OCENA WYSTĘPOWANIA ZNACZĄCEGO ZAGROŻENIA DLA ZDROWIA LUDZI ORAZ STANU ŚRODOWISKA	71
10.1. Zagrożenie dla zdrowia ludzi	71
10.2. Zagrożenie dla stanu środowiska	71
11. OCENA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA DOTYCHCZAS WYKONANYCH INSTALACJI OGRANICZAJĄCYCH ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ W ŚRODOWISKU GRUNTOWO – WODNYM	73
12. TECHNOLOGICZNE KONCEPCJE REMEDIACJI OBSZARU	77
12.1. Wariant 1	77
12.2. Wariant 2	80
12.3. Wariant 3	82
12.4. Wariant 4	84
12.5. Techniki uzupełniające	85
13. HARMONOGRAM FINANSOWO – CZASOWY WARIANTÓW REMEDIACJI	87
14. KRYTERIA WYBORU I IDENTYFIKACJA OPTIMALNEGO SPOSOBU REMEDIACJI.....	93

15.SZCZEGÓŁOWA CHARAKTERYSTYKA PROPONOWANEGO SPOSOBU REMEDIACJI	96
15.1. Główne cele remediacji.....	96
15.2. Planowany sposób przeprowadzenia remediacji	97
15.3. Założenia techniczno – technologiczne remediacji	98
15.4. Weryfikacja skuteczności remediacji.....	101
16.SPOSÓB POTWIERDZENIA PRZEPROWADZENIA REMEDIACJI	102
16.1. Identyfikacja zanieczyszczeń wskaźnikowych.....	102
16.2. Identyfikacja poziomu stężeń zanieczyszczeń wskaźnikowych koniecznych do uzyskania w ramach remediacji.....	102
16.3. Badania wymagane dla potrzeb potwierdzenia przeprowadzenia remediacji	103
17.WYTYCZNE DLA PROWADZENIA BADAŃ MONITORINGOWYCH	104
17.1. Etap przed rozpoczęciem remediacji	104
17.2. Etap remediacji	106
17.3. Etap po zakończeniu remediacji	107
18.HARMONOGRAM CZASOWY REMEDIACJI	108
19.KOSZTORYS DZIAŁAŃ REMEDIACYJNYCH	109
20.PODSUMOWANIE I WNIOSKI	110
21.WYKORZYSTANE MATERIAŁY	116
Spis rysunków.....	120
Spis fotografii.....	121
Spis tabel	121

SŁOWNIK UŻYWANYCH TERMINÓW

CHMURA ZANIECZYSZCZEŃ - Zanieczyszczenie emitowane przez ognisko zanieczyszczeń i rozprzestrzeniające się w formie podobnej do chmury w strumieniu wód podziemnych (Dowgiałło (red.), 2002).

FENOL (C_6H_5OH) - organiczny związek chemiczny, najprostszy związek z grupy fenoli. Od alkoholi odróżnia go bezpośrednie połączenie grupy hydroksylowej z pierścieniem aromatycznym, co wpływa na właściwości związku m.in. na wzrost właściwości kwasowych. Jest to bezbarwne, krystaliczne ciało stałe o ostrym zapachu. Różowieje na powietrzu. Substancja jest dobrze rozpuszczalna w wodzie oraz rozpuszczalnikach organicznych: etanolu, eterze dietylowym, glicerynie, benzenie i chloroformie.

MIGRACJA MASY W WODACH PODZIEMNYCH (transport masy) - suma procesów (dyspersja, konwekcja, dyfuzja, rozpad, wymiana jonowa) zachodzących podczas transportu (przemieszczania się) masy w strumieniu wód podziemnych. Substancje zanieczyszczające mogą migrować w przepływie pionowym przez strefę aeracji i poziomym w strumieniu wód podziemnych. W procesie migracji rozpatruje się przemieszczanie poszczególnych cząstek roztworu wodnego w pustych przestrzeniach skalnych z uwzględnieniem zjawisk fizykochemicznych między fazami ciekłymi oraz wzajemne oddziaływania między roztworem i skałą w procesach adwekcji, dyspersji, dyspersji hydrodynamicznej itp. Przebieg procesu migracji jest opisany równaniem transportu masy (równanie migracji) (Dowgiałło (red.), 2002).

OGNIKO ZANIECZYSZCZENIA WÓD PODZIEMNYCH - naturalne lub częściej sztuczne nagromadzenie substancji zanieczyszczających (realnie lub potencjalnie) wody podziemne. Występuje na powierzchni terenu lub w litosferze, atmosferze czy hydrosferze. Ogniska zanieczyszczenia wód podziemnych mogą mieć zróżnicowany charakter przestrzenny: punktowy (wiercenia, stacje paliw, magazyny), liniowy lub pasmowy (rzeki, kanały, drogi, rurociągi), powierzchniowy (składowiska odpadów, osadniki, pola ściekowe i irygacyjne) oraz obszarowy (emisja gazów i pyłów, nawożenie i chemizacja rolnictwa i leśnictwa) (Dowgiałło (red.), 2002).

PLAN REMEDIACJI - remediację historycznego zanieczyszczenia powierzchni ziemi przeprowadza się zgodnie z ustalonym planem remediacji. Projekt planu remediacji zawiera informacje o: 1) terenie wymagającym przeprowadzenia remediacji, poprzez wskazanie adresu i numerów działek ewidencyjnych oraz jego powierzchni; 2) aktualnym i, o ile jest to możliwe, planowanym sposobie użytkowania zanieczyszczonego terenu; 3) właściwościach gleby oraz rodzaju pokrycia terenu, w tym roślinności i zabudowie; 4) nazwach substancji powodujących ryzyko, wraz z wynikami badań zanieczyszczenia gleby i ziemi tymi substancjami, wykonanych przez laboratorium, o którym mowa w **art. 147a** obowiązek wykonania pomiarów wielkości emisji ust. 1 pkt 1 lub ust. 1a; 5) nazwach substancji powodujących ryzyko oraz ich zawartości w glebie i w ziemi, do jakich doprowadzi remediacja; 6) ocenie występowania znaczącego zagrożenia dla zdrowia ludzi lub stanu środowiska; 7) budowie geologicznej i warunkach hydrogeologicznych niezbędnych do dokonania oceny, o której mowa w pkt 6 – jeżeli zachodzi taka potrzeba; 8) planowanym sposobie przeprowadzenia remediacji; 9) planowanym terminie rozpoczęcia i zakończenia remediacji; 10) sposobie potwierdzenia przeprowadzenia remediacji oraz terminie przedłożenia dokumentacji z jej przeprowadzenia, w tym wyników badań zanieczyszczenia gleby i ziemi wykonanych przez laboratorium, o którym mowa w **art. 147a** obowiązek wykonania pomiarów wielkości emisji ust. 1 pkt 1 lub ust. 1a. (POŚ, 2017).

PROCES SAMOOCZYSZCZANIA - (*ang. natural attenuation*) odnosi się do przemian zanieczyszczeń podczas ich transportu w wodach podziemnych. Jest związane z szeregiem naturalnych (geogenicznych) procesów, umożliwiających redukcję stężeń lub ładunków zanieczyszczeń bez

dotatkowej stymulacji (1) destrukcyjnych: biodegradacja, (bio)transformacja, humifikacja, mineralizacja, rozkład/rozpad fotochemiczny oraz (2) niedestrukcyjnych: rozcieńczanie, filtracja, immobilizacja: (bio)sorpcja, wymiana jonowa, (bio)wytrącanie, parowanie, dyfuzja, dyspersja. Wyróżnia się MNA (*ang. monitored natural attenuation*) polega na kontroli/monitoringu procesów biogeochemicznych w celu przewidywania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w środowisku gruntowo – wodnym i związanego z tym ryzyka; ENA (*ang. enhanced natural attenuation*) w przypadku konieczności przyspieszenia uzyskania efektów procesów samooczyszczania wymagane jest wspomaganie; ANA (*ang. abiotic natural attenuation*) czynniki abiotyczne w głównym stopniu kształtują biotop i wpływają istotnie na zamieszkujące go organizmy które muszą na drodze ewolucji przystosować się do nich (Malina, 2007).

REKULTYWACJA - zespół działań zmierzających do przywrócenia naturalnego ukształtowania terenu lub osiągnięcia zawartości substancji chemicznych zgodnie z wymaganymi standardami zagospodarowania Zdegradowanego/zanieczyszczonego terenu (Malina, 2007).

REMEDIACJA - oczyszczanie środowiska gruntowo – wodnego na terenach zanieczyszczonych (Malina, 2007).

REWITALIZACJA - zespół zintegrowanych działań w celu przywrócenia dawnych lub stworzenia nowych funkcji użytkowych, ekonomicznych i/lub społecznych na terenie zdegradowanym/zanieczyszczonym (w tym przebudowa i modernizacja istniejącego pokrycia terenu) (Malina, 2007).

SKAŻENIE - zanieczyszczenie wody substancjami nie występującymi w niej w stanie naturalnym. Powoduje ono gwałtowne obniżenie jakości wody. Najczęściej: bakteryjne, radioaktywne, ropopochodne, metalami ciężkimi (Kleczkowski (red.), 1997).

SUBSTANCJA ZANIECZYSZCZAJĄCA - substancja występująca w wodach w wyniku działalności człowieka i wpływająca degradująco na ich naturalny skład. Efektem przenikania substancji zanieczyszczających do wód jest wzrost stężeń pierwiastków i związków w stosunku do składu naturalnego lub pojawienie się substancji obcych (np. syntetyczne substancje organiczne). Aby określić stopień zdegradowania wód, stosuje się rozpoznanie tzw. ogólnych wskaźników zanieczyszczeń: A – grupy substancji zanieczyszczających (ChZT, BZT5, AOX), B – towarzyszące substancje zanieczyszczające (BTEX, bor), C – ogólne (pH, Eh, PEW) (Kleczkowski (red.), 1997).

ŚRODOWISKO GRUNTOWO – WODNE - ogół elementów przyrodniczych (łącznie z organizmami żywymi) znajdujących się w stanie naturalnym lub przekształconym antropogenicznie. Środowisko gruntowo – wodne obejmuje skały, grunty, gleby, kopaliny, w których odbywa się przepływ wód podziemnych wraz z nimi.

TECHNIKA PUMP & TREAT – tzw. metoda pompuj i oczyszczaj. Metoda obejmuje w szerokim rozumieniu ekstrakcję wody podziemnej w celu jej oczyszczenia z powierzchni (Malina, 2007).

TEREN POPRZEMYSŁOWY - (*ang. brownfield*) nieużytkowany lub nie w pełni wykorzystywany teren przeznaczony pierwotnie pod działalność gospodarczą, zdegradowany/ zanieczyszczony w stopniu ograniczającym możliwość rozwoju i/lub przywrócenia funkcji gospodarczych (Malina, 2007).

TEREN ZANIECZYSZCZONY - obszar, na którym rzeczywiste zanieczyszczenie substancjami chemicznymi gruntu (gleby) oraz wód podziemnych i powierzchniowych występuje w stopniu przekraczającym wartości dopuszczalne (normatywne) albo przyjęte, jako dopuszczalne dla tego terenu na podstawie analizy ryzyka zdrowotnego i/lub środowiskowego (Malina, 2007).

TEREN ZDEGRADOWANY - obszar, na którym naturalne ukształtowanie powierzchni ziemi i krążenie wód zostało zmienione, a środowisko (powierzchnia ziemi i wody podziemne) zanieczyszczone w sposób ograniczający spełnianie funkcji użytkowych (Malina, 2007).

WODA PODZIEMNA - ① wody występujące w skałach skorupy ziemskiej. Główna ich część pochodzi z infiltracji opadów atmosferycznych (niekiedy także wód powierzchniowych), w małym stopniu z kondensacji pary wodnej w skorupie ziemskiej. Również nieznaczna ich część pochodzi z głębi ziemi przez wydzielanie się pary wodnej z roztworów magmowych lub przez odwodnienie minerałów (wody juwenilne), a także z zachowanych w osadach resztek wód z zanikłych mórz i innych zbiorników wodnych (wody reliktowe). Wody pochodzące z infiltracji, przemieszczając się przez strefę aeracji, tracą nieznaczną część na skutek związania siłami molekularnymi z ziarnami gruntu (woda błonkowata) oraz zatrzymując się na nieprzepuszczalnych lub słabo przepuszczalnych wkładkach (woda zawieszona). Pozostała, główna część, dążąc pod wpływem siły ciężkości w głąb skorupy ziemskiej napotyka warstwy wodoszczelne (np. iły) i gromadzi się nad nimi, tworząc poziomy wodonośne (zbiornik wód podziemnych). Litologia, głębokość i czas przebywania wody w środowisku skalnym kształtuje skład chemiczny i stopień mineralizacji wody. W zależności od warunków hydrogeologicznych i klimatycznych kształtują się zasoby wód podziemnych, które w wielu regionach świata stanowią podstawowy surowiec warunkujący rozwój gospodarczy. ② Wody wolne podlegające siłom ciężkości, występujące w strefie saturacji poniżej zwierciadła wód podziemnych w obrębie utworów wodonośnych. Największe znaczenie mają wody podziemne będące w obiegu, pochodzenia atmosferycznego, meteorycznego, a więc zasilane z opadów, słodkie o mineralizacji poniżej 1,0 lub 2,0 g/dm³. Zasilanie tych wód podziemnych następuje w procesie infiltracji rozpoczynającym się wsiąkaniem i kontynuującym przesączaniem przez strefę aeracji, w obrębie której woda jest częściowo magazynowana (retencja glebowa, retencja gruntowa), częściowo spływa (odpływ podpowierzchniowy, śródpokrywowy), a także paruje (parowanie podziemne). W strefie saturacji następuje przepływ ku ciekom i zbiornikom wód powierzchniowych (odpływ podziemny, drenaż wód podziemnych), a także zachodzi zatrzymanie części wody (retencja podziemna) (Dowgiałło (red.), 2002).

ZANIECZYSZCZENIE WÓD PODZIEMNYCH - procesy prowadzące do zmiany składu lub stanu wody podziemnej wywołane bezpośrednio lub pośrednio działalnością człowieka, powodujące mniejszą ich przydatność dla jednego lub wszystkich celów, którym wody te mogły służyć w swym naturalnym stanie. Jako zanieczyszczenie należy traktować wszelkie zmiany składu chemicznego wody, wywołane czynnikami naturalnymi wewnętrznymi (geogenicznymi) i zewnętrznymi (antropogenicznymi) (Kleczkowski (red.), 1997).

1. WPROWADZENIE

Podstawą formalno – prawną dla realizacji niniejszego opracowania jest umowa nr 1/ZP/2017 o wykonanie projektu planu remediacji składowiska „Zielona” zawarta w dniu 10.01.2017 r. pomiędzy: Skarbem Państwa - Regionalną Dyрекcją Ochrony Środowiska w Bydgoszczy a Akademią Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie. Zgodnie z §2 ust. 2 ww. umowy opracowanie zawiera projekt planu remediacji, o którym mowa w § 1 ust. 1 pkt 3 umowy.

Projekt planu remediacji obejmuje teren składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne, określonym na podstawie miarodajnych i reprezentatywnych wyników badań i analiz, w szczególności zaawansowanych badań środowiska gruntowo-wodnego i modeli numerycznych wykonanych w latach 2008-2017 przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie.

Projekt planu remediacji dotyczy wariantu najkorzystniejszego, zwanego dalej optymalnym, wyłonionego w wyniku wielokryterialnej analizy porównawczej przeprowadzonej dla czterech odpowiednio przygotowanych wariantów wstępnych, z których wszystkie uwzględniają całkowite usunięcie lub skuteczne unieszkodliwienie źródła emisji zanieczyszczeń.

Optymalny wariant koncepcji remediacji zaproponowany został na podstawie wiedzy eksperckiej oraz zestawienia aktualnie stosowanych rozwiązań i dobrych praktyk remediacji, w tym standardów działań przyjętych w bardziej rozwiniętych w tym względzie krajach (m.in. Stany Zjednoczone, Wlk. Brytania, państwa Europy Zachodniej). Ocena skuteczności optymalnego wariantu remediacyjnego została przeprowadzona na podstawie symulacji numerycznych w programie Visual Modflow, stanowiącym najbardziej zaawansowane narzędzie dla rozwiązywania tego typu skomplikowanych zagadnień.

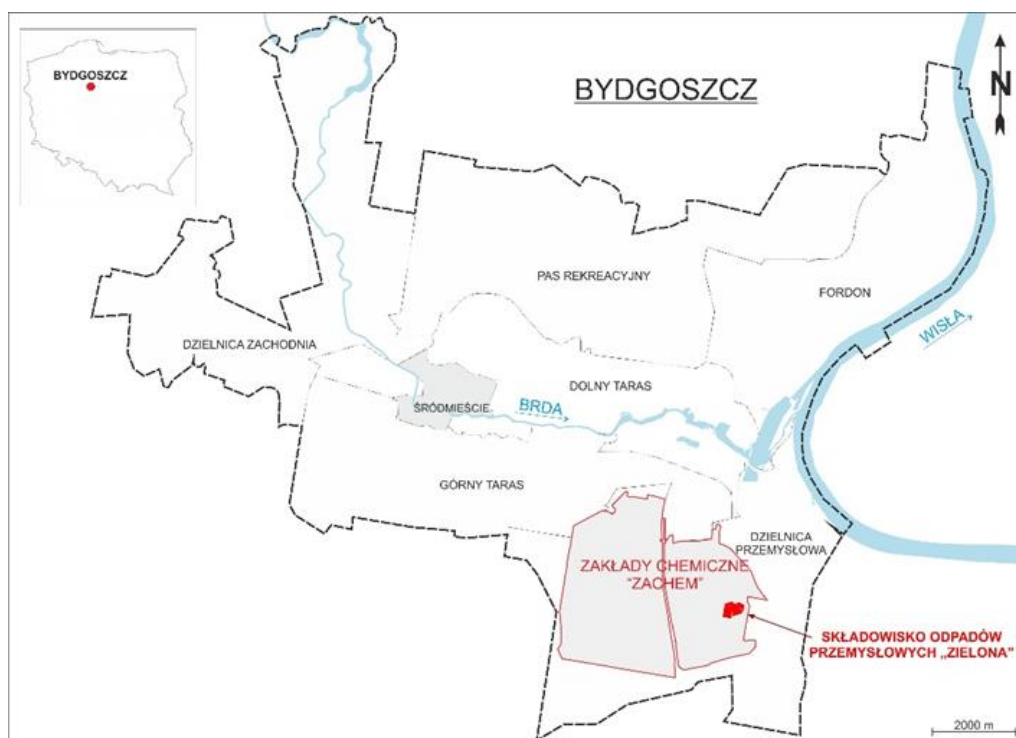
Projekt planu remediacji opracowany został w formie pozwalającej na jego wykorzystanie do wydania decyzji, o której mowa w art. 101m ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2016 r., poz. 672 ze zm.). Projekt planu remediacji zawiera wiążące wytyczne do opracowania wykonawczego projektu remediacji, w którym określony zostanie szczegółowy sposób remediacji ustalający m.in. parametry techniczne dla wszystkich obiektów i urządzeń przewidzianych do zastosowania. Najistotniejszą częścią ww. opracowania jest szczegółowa charakterystyka proponowanego sposobu remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” S.A. w Bydgoszczy oraz remediacji środowiska gruntowo-wodnego w obszarze oddziaływania składowiska wraz ze sposobem potwierdzenia przeprowadzenia tej remediacji.

Sprawozdanie z etapu nr III zostaje przedłożone przez Wykonawcę - AGH, zgodnie z §2 ust. 3 ww. umowy, Zamawiającemu - RDOŚ w Bydgoszczy oraz przedstawicielom Zamawiającego – Nadzorującym: dr hab. Małgorzacie Pruszkowskiej - Caceres oraz dr. hab. inż. Adamowi Postawie.

2. IDENTYFIKACJA OBSZARU WYMAGAJĄCEGO PRZEPROWADZENIA REMEDIACJI

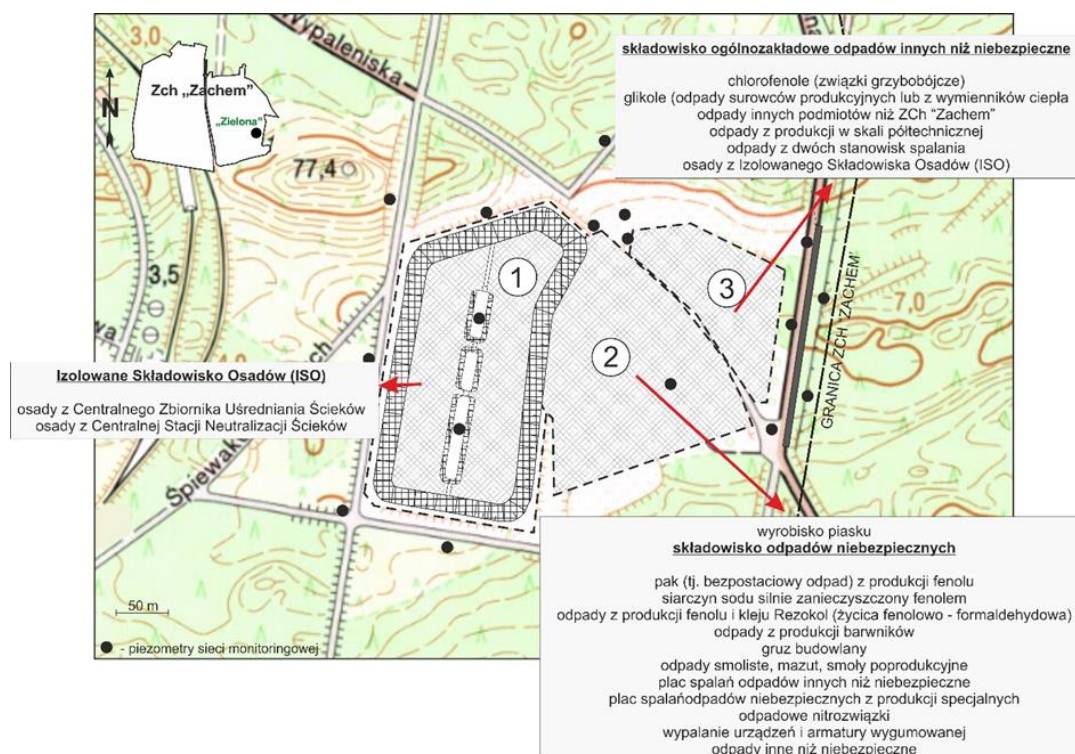
Projekt planu remediacji dotyczy obszaru składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” zlokalizowanego na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” S.A. w Bydgoszczy oraz strefy zanieczyszczonego środowiska gruntowo-wodnego (chmury zanieczyszczeń) występującej poza granicami ww. przedsiębiorstwa i związanej z niekorzystnym oddziaływaniem wspomnianego składowiska.

Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” zlokalizowane jest w granicach miasta Bydgoszczy w południowo – wschodniej części terenu dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” (Rys. 1). Zanieczyszczenia przenikające ze składowiska do podłoża z uwagi na przepływ wód podziemnych w kierunku na wschód i północny – wschód przemieściły się poza teren Zachem-u na odległość nawet 1,5 km.



Rys. 1. Lokalizacja składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”

Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” zbudowane jest z trzech kompleksów, tj. mniejszych obszarów depozycji odpadów, odpowiednio od zachodu: (1) Izolowanego Składowiska Osadów (ISO), (2) składowiska odpadów niebezpiecznych w dawnym wyrobisku piasku oraz (3) składowiska ogólnozakładowego odpadów innych niż niebezpieczne (Rys. 2). Składowisko położone w granicach dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy zlokalizowane jest pomiędzy ul. Zieloną i ul. Elektryczną, a obejmuje działki ewidencyjne lub ich fragmenty o numerach: 9/95, 9/96, 9/97, 9/99, 9/101, 9/103, 9/105 i 9/107. W niniejszym projekcie planu remediacji, w odniesieniu do kompleksu bezimiennych składowisk używana jest nazwa składowisko „Zielona”. Jest to zgodne z nazewnictwem tego obszaru stosowanym w Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy.



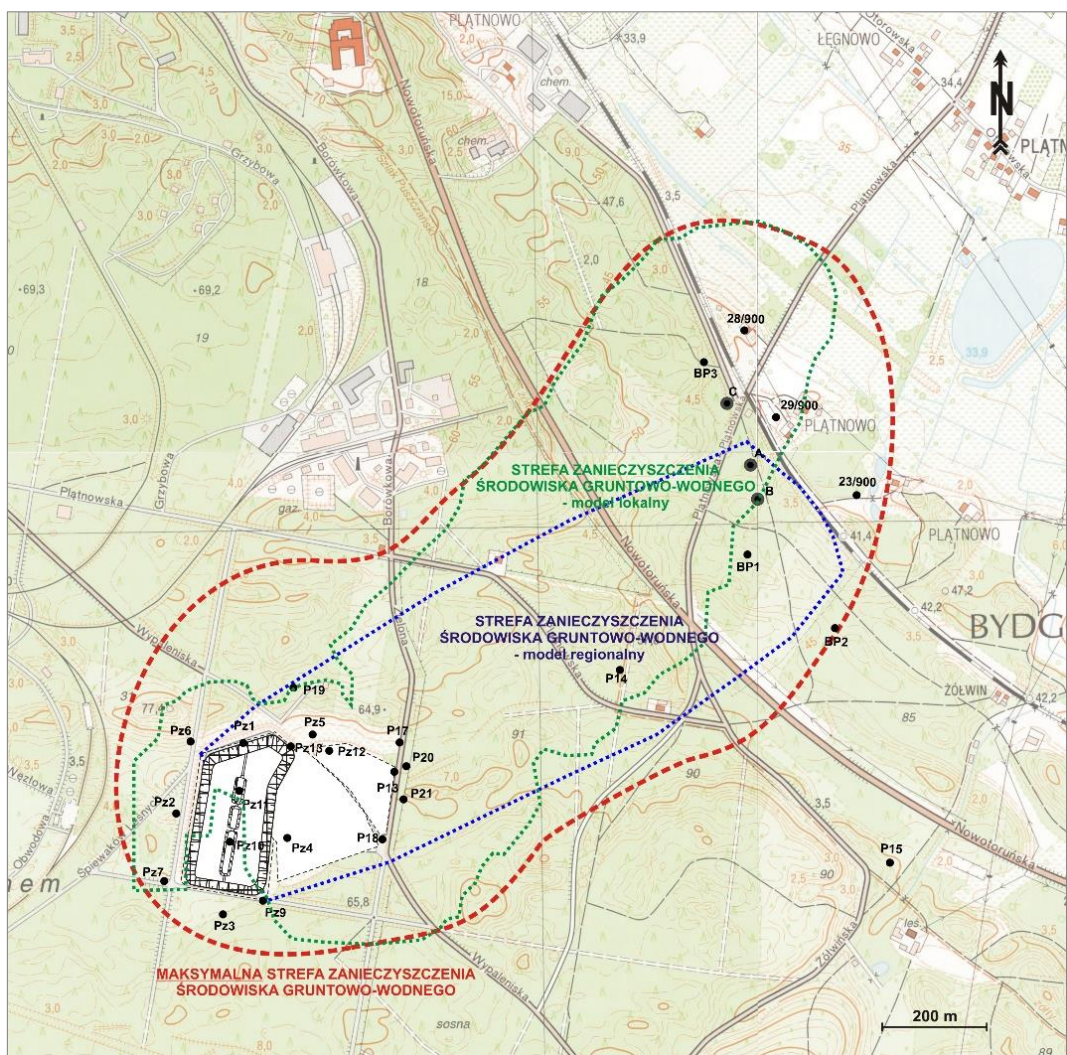
Rys. 2. Struktura składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”

Chmura zanieczyszczonych wód podziemnych, genetycznie związanych ze składowiskiem „Zielona” migruje w warstwie wodonośnej, na wschód i północny – wschód w kierunku terenów zamieszkałych położonych w dolinie Wisły (Łęgowo, Otorowo, Płatnowo) (Rys. 3). Chmura przemieszcza się w gruntach podścielających łącznie 28 działek i fragmentów działek ewidencyjnych o numerach podanych w tabeli (Tab. 1).

W świetle wykonanych i zweryfikowanych badań modelowych powierzchnia terenu wymagającego przeprowadzenia remediacji, gdzie zanieczyszczenia są stwierdzane w obrębie środowiska gruntowo-wodnego wynosi około 108,518 ha. Przy czym składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” zajmuje sumaryczną powierzchnię około 11,3 ha, z czego około 4,3 ha przypada na Izolowane Składowisko Odpadów (ISO), zaś na pozostałe kompleksy składowisk około 7 ha.

Na obszar wytypowany jako strefa zanieczyszczonego środowiska gruntowo-wodnego w związku z emisją zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” składa się:

- zasięg chmury zanieczyszczonych wód podziemnych, stanowiący wynik z regionalnego modelu numerycznego obszaru dawnych ZCh „Zachem” w Bydgoszczy; symulacja została wykonana dla warunków migracji substancji zanieczyszczającej o charakterze konserwatywnym, tj. chlorków Cl⁻ (strefa oznaczona kolorem niebieskim na Rys. 3 – model regionalny (Czop, 2010)).
- zasięg chmury zanieczyszczonych wód podziemnych, stanowiący wynik lokalnego modelu numerycznego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” w dawnych ZCh „Zachem” w Bydgoszczy; symulacja została wykonana dla szczegółowo odwzorowanej budowy geologicznej i najbardziej niekorzystnych warunków migracji substancji reaktywnej tj. fenolu (strefa oznaczona kolorem zielonym na Rys. 3 – model lokalny (Pietrucin, 2015)).



Rys. 3. Zasięg występowania zanieczyszczeń w obrębie środowiska gruntowo-wodnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”

Ostateczny zasięg strefy wymagającej podjęcia działań remediacyjnych środowiska gruntowo-wodnego, w związku z emisją ładunku zanieczyszczeń ze składowiska „Zielona”, powstał na skutek połączenia ww. stref zanieczyszczonych wraz ze strefą buforową. Przyjęcie strefy buforowej ma na celu zapewnienie skuteczne oczyszczenie środowiska bez pozostawienia substancji chemicznych w gruncie i wodach podziemnych.

Tab. 1. Wykaz działek ewidencyjnych w obrębie terenu wymagającego remediacji w związku z zanieczyszczeniem środowiska gruntowo-wodnego

Lp.	Nr działki	Obręb ewidencyjny	Pow. całkowita [ha]	Pow. zanieczyszczona [ha]	% udział pow. zanieczyszczonej	Właściciel
1	86/1	137	20,930	7,743	37,0	Skarb Państwa
2	85/3	138	22,217	13,822	62,2	Skarb Państwa

3	8	460	1,395	0,793	56,8	Skarb Państwa-PKP
4	10	460	0,354	0,354	100,0	Skarb Państwa-PKP
5	1 (na N)	460	7,950	3,110	39,1	IK S.A.
6	7	460	1,057	1,057	100,0	osoba fizyczna
7	9	460	0,821	0,486	59,2	Miasto Bydgoszcz
8	11	461	1,995	1,806	90,5	Skarb Państwa
9	82/9	461	8,301	0,842	10,1	Skarb Państwa-Lasy Państwowe
10	13 (droga na N)	461	0,291	0,241	82,7	Skarb Państwa
11	1 (między 9 a 2 działką)	461	1,789	1,789	100,0	osoba fizyczna
12	12	461	0,028	0,028	100,0	osoba fizyczna
13	2 (łącznie działki 2/1, 2/2 oraz 2/3)	461	1,498	1,498	100,0	osoby fizyczne
14	3	461	2,549	2,339	91,8	gmina Bydgoszcz
15	96	136	21,610	0,249	1,2	Skarb Państwa
16	1/50	136	105,913	7,169	6,8	Skarb Państwa
17	9/20	137	8,927	6,893	77,2	Supravis
18	9/21	137	0,203	0,203	100,0	Supravis
19	13 (droga na S)	137	5,396	2,019	37,4	gmina Bydgoszcz
20	91	137	25,970	22,334	86,0	Skarb Państwa
21	9/90	137	1,4548	0,0615	4,2	IK S.A.
22	9/93	137	1,8255	0,6696	36,7	IK S.A.
23	9/94	137	0,2605	0,1654	63,5	IK S.A.
24	9/95	137	10,7443	9,6788	90,1	IK S.A.
25	9/96	137	0,1999	0,1999	100,0	IK S.A.
26	9/97	137	0,0652	0,0652	100,0	IK S.A.
27	9/98	137	0,3404	0,3404	100,0	Gamatronic System
28	9/99	137	1,1064	1,1064	100,0	Gamatronic System
29	9/100	137	1,688	0,9373	55,5	IK S.A.
30	9/101	137	0,7740	0,7740	100,0	IK S.A.
31	9/102	137	0,1002	0,1002	100,0	Chemwik
32	9/103	137	1,7660	1,7660	100,0	Gamatronic System
33	9/105	137	4,2753	4,2753	100,0	Gamatronic System
34	9/106	137	0,2274	0,2274	100,0	Gamatronic System
35	9/107	137	5,4469	5,4469	100,0	IK S.A.
36	35	138	0,971	0,933	96,1	gmina Bydgoszcz
37	1/6	138	0,092	0,083	90,1	gmina Bydgoszcz

38	90/8	138	23,516	5,358	22,8	Skarb Państwa
39	8	138	0,262	0,002	0,8	gmina Bydgoszcz
40	90/7	138	6,073	0,006	0,1	Skarb Państwa
41	10/2	461	3,727	1,528	41,0	osoba fizyczna
42	10/1	461	0,020	0,020	100,0	osoba fizyczna
SUMA:			304,13	108,518		

** wykaz działek ewidencyjnych powstał na skutek nałożenia maksymalnej strefy zanieczyszczenia środowiska
gruntowo-wodnego na kataster Polski
(ewidencja gruntów i budynków dostęp RDOŚ) – źródło: mapy.geoportal.gov.pl*

3. ZAGOSPODAROWANIE I SPOSÓB UŻYTKOWANIA TERENU

3.1. Historia użytkowania terenu

Historia depozycji odpadów i działalności eksploatacyjnej w rejonie składowiska „Zielona” sięga lat 40. XX wieku. Początkowo związana była z działalnością w okresie wojennym niemieckich zakładów DAG Fabrik Bromberg. Produkcję, a co za tym idzie i depozycję odpadów, po II wojnie światowej wznowiono w roku 1948. Kolejnym etapem eksploatacji terenu było rozpoczęcie wydobywania piasku, przy czym nieznany jest dokładny zasięg powstałego w ten sposób wyrobiska.

W latach 1960 – 1975 nieczynne i nieprzystosowane wyrobisko funkcjonowało jako składowisko odpadów niebezpiecznych, głównie paku pofenolowego z produkcji fenolu oraz kleju Rezokol, w skład którego wchodził pofenolowy siarczyn sodowy, a także odpady z produkcji barwników i półproduktów barwnikarskich (nr 2 na Rys. 2). Składowisko to aktualnie obejmuje teren działki nr 9/105 obręb 137, jednak miejsce to nigdy nie było formalnym składowiskiem w rozumieniu ustawy o odpadach. Szacuje się, iż na powierzchni 4 ha zdeponowano około 82 tys. ton odpadów (Narwojsz, 2007). Ze względu na generalny brak danych nie tylko w odniesieniu do samego terenu depozycji (m.in. nieznany rozmiar wyrobiska i jego głębokość), ale również ilości składowanych odpadów, które lokowano w sposób nieuporządkowany i bezładny trudno zweryfikować przytoczone dane. Na podstawie danych archiwalnych (WS Atkins, 2007; Andrzejewski, 2011) stwierdzono w sągu składowiska odpady smoliste, mazut oraz smoły poprodukcyjne. Obszar północno – zachodni dawnego wyrobiska wypełniony jest barwnikami, siarczynem pofenolowym oraz bardzo zróżnicowanym materiałem, w tym szmatami i papierem. Centralną i wschodnią część składowiska wypełnia głównie gruz budowlany. Eksploatacja składowiska odbywała się do czasu oddania do użytku składowiska odpadów niebezpiecznych przy ul. Lisiej oraz technologii zagospodarowania pofenolowego siarczynu sodowego w zakładach celulozowo – papierniczych.

Składowisko odpadów niebezpiecznych było użytkowane w latach 1984 – 1994 jako plac spalań odpadów innych niż niebezpieczne, niebezpiecznych z produkcji specjalnych (odpadowe nitrozwiazki) oraz wypalanie urządzeń i armatury wygumowanej. W związku z brakami w zakresie izolacji podłoża i systemu drenażu odcieków, a przede wszystkim nie wykonaniem żadnych zabezpieczeń chroniących powietrze przed emisją zanieczyszczeń, plac spalań został zlikwidowany w połowie lat 90. XX wieku.

Łączna miąższość odpadów zdeponowanych na obszarze dawnego składowiska odpadów niebezpiecznych osiąga miąższość około 15 m. Spąg składowiska znajduje się najprawdopodobniej na rzędnej +55 m n.p.m., natomiast powierzchnia terenu na poziomie około +70 m n.p.m. Po formalnym zamknięciu składowiska odpady inne niż niebezpieczne deponowano na obrzeżach terenu w sposób niezorganizowany. Materiał ten zasypywano gruntem. Aktualnie obszar dawnego składowiska odpadów niebezpiecznych (dz. nr 9/105) jest nieczynny, częściowo zrehabilitowany na podstawie decyzji Wojewody Kujawsko-Pomorskiego z dnia 29.11.2007 r. znak: WSRiRW-III-DL/6617-2/7/07 w przedmiocie działań naprawczych środowiska gruntowo-wodnego w rejonie ul. Zielonej. Działania naprawcze prowadzone na tym terenie w latach 2008-2013 nie przyniosły jednak oczekiwanego efektu ekologicznego, czego rezultatem jest pogłębiająca się szkoda w środowisku gruntowo-wodnym. Aktualnie trwa egzekucja ww. decyzji.

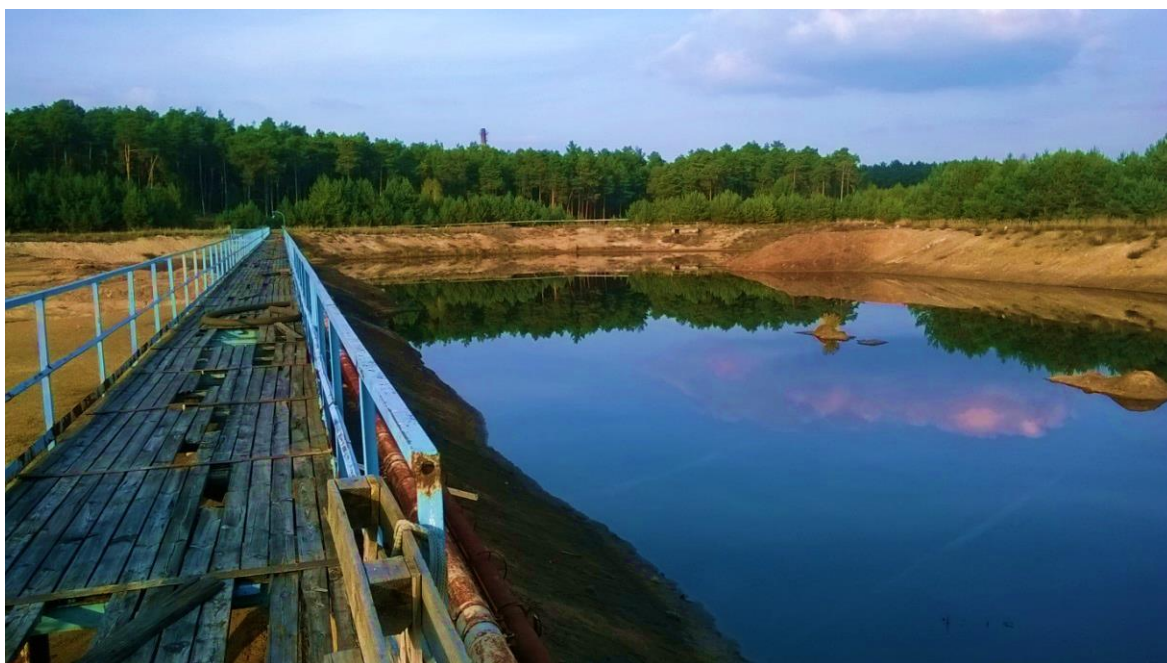
W latach 1987 – 1991 wybudowano Izolowane Składowisko Osadów (ISO) na zachód od placu spalań, a częściowo na terenie dawnego wyrobiska po eksploatacji piasku (nr 1 na Rys. 2, aktualnie teren działki nr 9/107 obręb 137). Podczas budowy, osady z obszaru ISO deponowano na składowisku ogólnozakładowym. Obiekt o powierzchni 4 ha zaprojektowano na przyjęcie odpadów o pojemności 188 tys. m³. Od roku 1992 składowisko przyjmowało osady z Centralnego Zbiornika Uśredniania Ścieków (Fot. 1). Po uruchomieniu Centralnej Stacji Neutralizacji Ścieków (CSN) osady przetłaczano bezpośrednio do ISO, a po wprowadzeniu procesu odwirowania osadów przewożono je samochodami. Składowisko posiadało izolację dna złożoną z dwóch warstw folii PCV i oraz system drenażu odcieków. Zaprojektowano i wykonano również sieć monitoringową środowiska gruntowo-wodnego, w postaci piezometrów.

Zgodnie z raportem „*due diligence*” wykonanym dla Grupy Ciech S.A. w roku 2006, większość odpadów, tj. pofenolowy siarczyn sodowy, odpady z produkcji barwników i półprodukty barwnikarskie oraz grys wapienny zostało wywiezionych (Tab. 2).

Grupa Ciech podjęła się również likwidacji silnie zanieczyszczonych gruntów oraz eliminacji chlorofenoli w ilości 19000 Mg. Łączna masa wywiezionych odpadów ze składowiska wyniosła 76500 Mg. Wzdłuż południowo – zachodniej części składowiska „Zielona” wykonano remediację ex-situ, polegającą na oczyszczeniu wydobytego gruntu.

Tab. 2. Inwentaryzacja odpadów wywiezionych ze składowiska „Zielona” (Zachem, 1991)

	Rodzaj odpadu	Masa odpadu [Mg]
1.	Pofenolowy siarczyn sodowy	51400
2.	Pak pofenolowy	2300
3.	Odpady z produkcji barwników i półprodukty barwnikarskie	19600
4.	Grys wapienny	3200



Fot. 1. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” – część ISO (fot. D. Pierri)

W roku 1989, na wschód od placu spalań, zapoczątkowano budowę składowiska ogólnozakładowego odpadów innych niż niebezpieczne (nr 3 na Rys. 2, aktualnie teren działki nr 9/103). Teren pomiędzy ul. Zieloną a ul. Wypaleniska o powierzchni 1,3 ha zaadaptowano do nowej funkcji poprzez konstrukcję drenażu poniżej oryginalnej powierzchni terenu (rzędna około +58 m npm). Szacuje się, iż na składowisku o pojemności 65 tys. m³ do roku 2000 zdeponowano 27,1 tys. ton odpadów, sięgających 3 m powyżej powierzchni terenu. W związku z przepełnieniem składowiska, poddano je rekultywacji. W celu monitorowania środowiska gruntowo – wodnego w rejonie składowiska wykonano sieć obserwacyjną.

Wszystkie odpady produkcyjne deponowane na składowisku były prawdopodobnie zmieszane z mniej licznymi odpadami z produkcji prowadzonej w skali półtechnicznej i z dwóch stanowisk spalania odpadów. Dostrzegalne są ślady odpadów pochodzące z produkcji związków grzybobójczych (chlorofenole) i z wymienników ciepła lub odpadów surowców (glikole). Dopuszcza się możliwość, iż niektóre odpady były własnością innych podmiotów niż Zakłady Chemiczne „Zachem” i jego prawni poprzednicy (Narwojsz, 2007).

3.2. Stan aktualny

Z punktu widzenia formalno-prawnego na kompleks składowisk odpadów przemysłowych „Zielona” składają się 2 składowiska odpadów (Izolowane Składowisko Odpadów – zlokalizowane na działce nr 9/107 obręb 137 Bydgoszcz oraz Ogólnozakładowe Składowisko Odpadów OSO położone na dz. Nr 9/103 obręb 137) a także miejsce depozycji odpadów niebezpiecznych (siarczyn pofenolowy), położone na działce nr 9/105 obręb 137. Wszystkie wymienione powyżej obszary depozycji wchodzące w skład składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy mają status nieczynnych, z tym, że miejsce depozycji siarczynu pofenolowego stanowi miejsce nieprzeznaczone do magazynowania lub składowania odpadów w rozumieniu ustawy o odpadach. Zgodnie z dokumentami administracyjnymi większość terenu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” została nieskutecznie zrehabilitowana, przy czym działania te w żaden sposób nie tylko nie zatrzymały, ale nawet nie ograniczyły migracji zanieczyszczeń zakumulowanych w bryle składowisk do warstwy wodonośnej i dalej w strumieniu wód podziemnych. Nie podjęto również jakichkolwiek działań naprawczych w zakresie remediacji zdegradowanych komponentów środowiska gruntowo-wodnego. Z formalnego punktu widzenia, rekultywacji nie została poddana tylko część tzw. Izolowanego Składowiska Osadów (ISO, aktualnie dz. nr 9/107).

Aktualnie w części północno-wschodniej nieużytkowanego Izolowanego Składowiska Osadów (ISO) uformował się zbiornik wód opadowych, które dodatkowo wymywają zanieczyszczenia z masy zgromadzonych w nim odpadów przemysłowych z produkcji prowadzonej w dawnych Zakładach Chemicznych „Zachem”. Infrastruktura techniczna składowiska, tj. rurociągi, podest przęsłowy, piezometry itp. ulegają postępującej degradacji w związku z brakiem jakichkolwiek prac remontowych.

Pozostałe części składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” pokryte są w większości utworami piaszczystymi z domieszką frakcji pylastej i ilastej oraz materii organicznej. Warstwa ta nie ma charakteru izolacyjnego, stąd nie zabezpiecza bryły odpadów przed wnikaniem wód opadowych.

W części tzw. obszaru zrekultywowanego odpady zostały pokryte geomembraną, która również nie ma właściwości izolacyjnych. Prawdopodobnie jej zastosowanie miało na celu utrzymanie kształtu nowo uformowanej bryły składowiska. Na powierzchni terenu w obrębie składowiska „Zielona” występują liczne pozostałości rozebranych i niedokończonych obiektów budowlanych, jak również fragmenty dróg technologicznych pokrytych płytami betonowymi oraz duże ilości gruzu i cegieł. Szacuje się, iż 50% powierzchni składowiska pokryte jest roślinnością w ramach postępującej sukcesji naturalnej, w tym w postaci drzew i krzewów oraz roślin pionierskich.

Stan składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” uległ znaczniej zmianie w roku 2014, kiedy to dokonano nielegalnej wywózki kilkuset ton zdeponowanego odpadu. Wytworzyło to nieckę na powierzchni terenu o wymiarach około 20 × 50 m (1 ar), w obrębie której bezpośrednio odstonięciu uległa warstwa wtórnie zrekrytalizowanego siarczynu sodowego Na_2SO_3 zanieczyszczonego fenolem, który jak się okazało nie został najprawdopodobniej w całości usunięty ze składowiska. Opady atmosferyczne mają pełną możliwość rozpuszczania odpadów, co intensyfikuje proces infiltracji substancji do gruntu i wód podziemnych.



Fot. 2. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” w Bydgoszczy – miejsce nielegalnej depozycji szlamu posolankowego, stan na 8.05.17 (fot. D. Pierri)

Na przełomie kwietnia i maja 2017 r. doszło do kolejnej nielegalnej aktywności na terenie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” polegającego na depozycji białych osadów w niecce usytuowanej na działce nr 9/105 obręb 137 powstałej w miejscu po wcześniejszej nielegalnym usunięciu opadów w 2014 r. Teren ten został przygotowany do depozycji poprzez roboty ziemne wykonane sprzętem ciężkim (w terenie widoczne były odciski gąsienic) z usypaniem grobli ziemnych dla zatrzymania rozptyłu półpłynnych odpadów. Osady pochodziły z 2 zbiorników magazynujących szlam posolankowy na obszarze dawnego oddziału syntezy dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy przy ul. Petersona. Szacuje się, iż w jednym zbiorniku o średnicy około 20 m było zgromadzone minimalnie 150 - 300 m³ szlamu (zakładając podobieństwo do istniejącego i niezlikwidowanego zbiornika nr 3, gdzie miąższość warstwy osadu waha się w granicach 0,5 – 1 m).

Oznacza to, że na składowisku może znajdować się minimalnie około 300 - 600 m³ szlamu posolankowego. Aktualnie „wylewisko” szlamu obejmuje powierzchnię około 400 m² (4 ary) (Fot. 2, 3).



Fot. 3. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” w Bydgoszczy – miejsce nielegalnej depozycji szlamu posolankowego, stan na 8.05.17 (fot. D. Pierri)

Tereny położone w strefie oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” gdzie nastąpiło zanieczyszczenie środowiska gruntowo – wodnego poprzez przedostanie się substancji toksycznych do strumienia wód podziemnych i ich dalszą migrację w kierunku północno – wschodnim i wschodnim, stanowią grunty leśne. Stanowią je: (a) lasy zgodnie z definicją podaną w przepisach o lasach, (b) grunty zrekultywowane na potrzeby gospodarki leśnej i (c) grunty pod drogami dojazdowymi do gruntów leśnych, a także grunty zadrzewione i zakrzewione.

Większość powierzchni obejmującej strefę oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” należy do Skarbu Państwa i znajduje się w użytkowaniu wieczystym Lasów Państwowych. Pozostałe niewielkie działki również są własnością Skarbu Państwa i znajdują się w użytkowaniu wieczystym: (a) Infrastruktury Kapuściska S.A. w upadłości likwidacyjnej, (b) Miasta Bydgoszcz oraz (c) innych podmiotów.

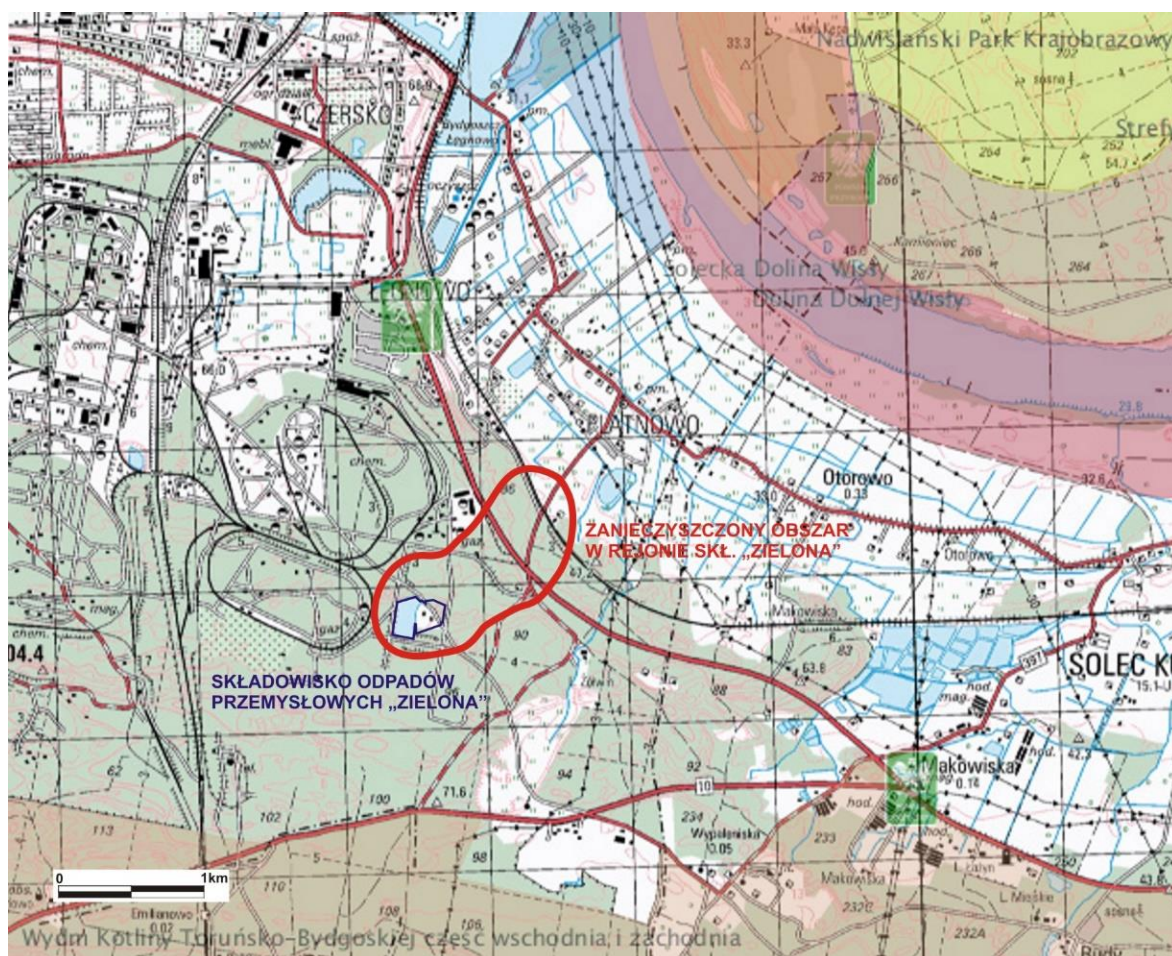
3.3. Uwarunkowania przyrodnicze

Obszar dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, w tym rejon składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, nie został dotychczas poddany inwentaryzacji przyrodniczej czy też szerszej kontroli stanowisk roślinnych i zwierzęcych, w tym w szczególności gatunków objętych ochroną prawną. Wiąże to za sobą utrudnienia w określeniu stanu wyjściowego dla planowanych do podjęcia prac remediacyjnych. Należy jednak zwrócić uwagę, iż wysoki stopień lesistości oraz odizolowania od skupisk ludzkich omawianego obszaru tworzą dogodne warunki do rozwoju flory

i fauny, tym bardziej, że teren ten przez długie lata był wyłączony z użytkowania, a dostępność znacznie ograniczona.

Uwarunkowania przyrodnicze rejonu składowiska odpadów „Zielona” są zdeterminowane w większości przez położenie obszaru badań w obrębie mezoregionu Kotliny Toruńskiej, powstałej na skutek erozyjnej działalności wód lodowcowych i rzecznych oraz procesów eolicznych. Charakteryzuje się występowaniem rozległych pól wydm śródlądowych, porośniętych borem sosnowym z domieszkami gatunków liściastych dębu, brzozy, grabu i innych. Wpływ zanieczyszczonych wód podziemnych na drzewostan Puszczy Bydgoskiej, położonej w granicach Kotliny Toruńskiej, nie został jednak przebadany.

Najważniejszym obszarem ochrony przyrody położonym najbliżej w stosunku do rejonu dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, jest Obszar Natura 2000 „Dolina Dolnej Wisły” (kod obszaru PLB040003). W rejonie Bydgoszczy rozciąga się środkowa część omawianego obszaru tzw. Wisła Solecka lub Solecza Dolina Wisły, która bierze swój początek od Solca Kujawskiego i kontynuuje się aż do Świecia (Rys. 4). Obszar Natura 2000 obejmuje korytarz o szerokości około 1-1,5 km zawierający bezpośrednie koryto rzeki Wisły oraz obszary cenne przyrodniczo na jego brzegach.



Rys. 4. Formy ochrony przyrody w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”

Obszar Natura 2000 „Dolina Dolnej Wisły” (PLB040003) stanowi ostoję ptasią, a występują tu co najmniej 44 gatunki ptaków z Załącznika I Dyrektywy Ptasiej oraz 4 gatunki z Polskiej Czerwonej Księgi. Obszar Natura 2000 stanowi również teren lęgowy dla ok. 180 gatunków ptaków, a także bardzo ważną ostoję dla ptaków migrujących i zimujących. Zinventaryzowano również bogatą faunę zwierząt kręgowych, w tym ryby, płazy i ssaki. Do najcenniejszych zbiorowisk roślinnych w Dolinie należą różne typy łągów oraz murawy kserotermiczne. Flora roślin naczyniowych liczy około 1350 gatunków. Występują liczne gatunki roślin zagrożonych i prawnie chronionych.

W obrębie części obszaru Natura 2000 (PLB040003) tj. „Soleckiej Doliny Wisły” chronionych jest 11 typów siedlisk nadrzecznych oraz związanych z nimi gatunków roślin i zwierząt. W Dolinie odnotowano występowanie m.in. 34 gatunki ptaków wymienionych w Załączniku I Dyrektywy Ptasiej, gatunki zwierząt wymienionych w Załączniku II Dyrektywy Siedliskowej, w tym ssaki (nietoperz mopek zachodni, bóbr europejski, wydra europejska), płazy (kumak nizinny), ryby (minóg rzeczny, łosoś szlachetny, kielb białopłetwy, boleń, rhodeus, koza), bezkręgowce (czerwończyk nieparek, pachnica dębowa) oraz rośliny naczyniowe wymienione w Załączniku II Dyrektywy Siedliskowej: leniec bezpodkwiatkowy, sasanka otwarta, starodub łąkowy.

Obszar Natura 2000 „Dolina Dolnej Wisły” we fragmencie na wysokości miejscowości Otorowo, Płatnowo i Łęgowo aż do nieco poniżej ujścia rzeki Brdy jest bezpośrednio zagrożony przez toksyczne związki chemiczne przenikające z licznych zidentyfikowanych i dotychczas jeszcze nieujawnionych ognisk zanieczyszczeń zlokalizowanych na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Ogniskiem zanieczyszczeń o największym potencjale toksyczności jest w szczególności składowisko odpadów przemysłowych „Zielona”. Substancje toksyczne migrują w strumieniu wód podziemnych z obszaru wysoczyzny, gdzie znajdowało się wspomniane przedsiębiorstwo i występują wszystkie ogniska zanieczyszczeń w kierunku doliny Wisły, gdzie dopływają do wód powierzchniowych tj. licznych zbiorników wodnych i rowów zasilających rzekę Wisłę. Możliwy jest również scenariusz bezpośredniego dopływu zanieczyszczeń do rzeki Wisły. Z uwagi na transport mutagennych i kancerogennych związków chemicznych w płytkich wodach podziemnych następuje zanieczyszczenie gleb i gruntów a w konsekwencji przeniesienie wpływów na rośliny i zwierzęta. Mając na uwadze fakt, że Obszar Natura 2000 „Dolina Dolnej Wisły” jest obszarem lęgowym licznych chronionych gatunków ptaków, stwarza to śmiertelne zagrożenie dla ich populacji.

W rejonie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy znajdują się także inne formy ochrony przyrody w tym Obszar Chronionego Krajobrazu Wydm Kotliny Toruńsko – Bydgoskiej oraz pomniki przyrody w postaci cennych okazów drzew (sosna pospolita „Dominika” – ul. Świetlicowa oraz dąb dwupienny szypułkowy „Eugeniusz” – ul. Nowotoruńska).

3.4. Zamierzenia planistyczne

Miasto Bydgoszcz nie posiada zintegrowanego planu zagospodarowania przestrzennego. Obszar, który obejmuje rejon składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” w dawnych Zakładach Chemicznych „Zachem” objęty jest MPZP nr 144 Łęgnowo – Park Technologiczny.

Dla obszaru dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, z licznymi obiektami i instalacjami technologicznymi, magazynami oraz towarzyszącą infrastrukturą techniczną stosuje się ogólne ustalenia przeznaczone dla tych terenów przemysłowych. Przeznaczenie podstawowe obejmuje zabudowę produkcyjną z preferencją działalności wykorzystującej nowoczesne technologie, zabudowę składową i magazynową, zabudowę biurową i socjalną, a także budynki i budowle związane z transportem samochodowym, w tym parkingi dla samochodów ciężarowych. Przeznaczenie uzupełniające tych terenów obejmuje: zabudowę administracyjną, usługową, budynki i budowle infrastruktury technicznej, bocznic kolejowe wraz z zabudową towarzyszącą związaną z obsługą bocznic oraz z załadunkiem i rozładunkiem towarów, drogami związanymi z komunikacją wewnętrzną, a także zielenią urządzoną. Bardzo ważną informacją jest fakt utrzymania przemysłowego charakteru wykorzystania terenu, bez przemianowania jego funkcji do zupełnie nowych, dotychczas nie stosowanych. Pozytywnym aspektem jest również nacisk na działalności wykorzystujące nowoczesne technologie, przez co należy rozumieć produkcyjną lub usługową działalność gospodarczą charakteryzującą się wysoką wartością dodaną wytwarzanych produktów lub świadczonych usług oraz znacznym udziałem wysoko wykwalifikowanej kadry pracowniczej o profilu techniczno-inżynierskim, obejmującą w szczególności laboratoria badawcze, instytucje finansowe i ubezpieczeniowe, jednostki projektowe i konsultingowe, instytucje gospodarcze, środki masowej komunikacji i łączności, a także te, których powyższe grupy nie dotyczą bezpośrednio, ale mają charakter ich obsługi (MPZP nr 144).

Mając na uwadze optymalne zagospodarowanie terenu po dawnych Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy bezwzględnie konieczne jest wykonanie rozpoznania skali i stopnia skażenia środowiska gruntowo – wodnego, tj. gleb, gruntów i wód podziemnych w obrębie planowanych do zagospodarowania działek. Może ono przebiegać w dwojaki sposób poprzez: (a) sukcesywne badania planowanych do zagospodarowania działek lub też (b) wykonanie kompleksowej waloryzacji terenów po dawnym ZCh „Zachem” zweryfikowanej w oparciu o wyniki badań archiwalnych i wykonanych dla tych potrzeb.

Obszar wpływu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na środowisko gruntowo-wodne wychodzi istotnie poza granice dawnych ZCh „Zachem” na zamieszkane i użytkowane rolniczo tereny Płatnowa i Łęgnowa. Wspomniane tereny rozwijają się intensywnie w związku z migracją mieszkańców z centrum Bydgoszczy i powstawaniem licznych domów jednorodzinnych, co skutkuje z kolei sukcesywnym ograniczaniem dominującego rolniczego użytkowania terenu.

4. SZCZEGÓŁOWA CHARAKTERYSTYKA OBSZARU WYMAGAJĄCEGO PRZEPROWADZENIA REMEDIACJI

4.1. Morfologia powierzchni terenu

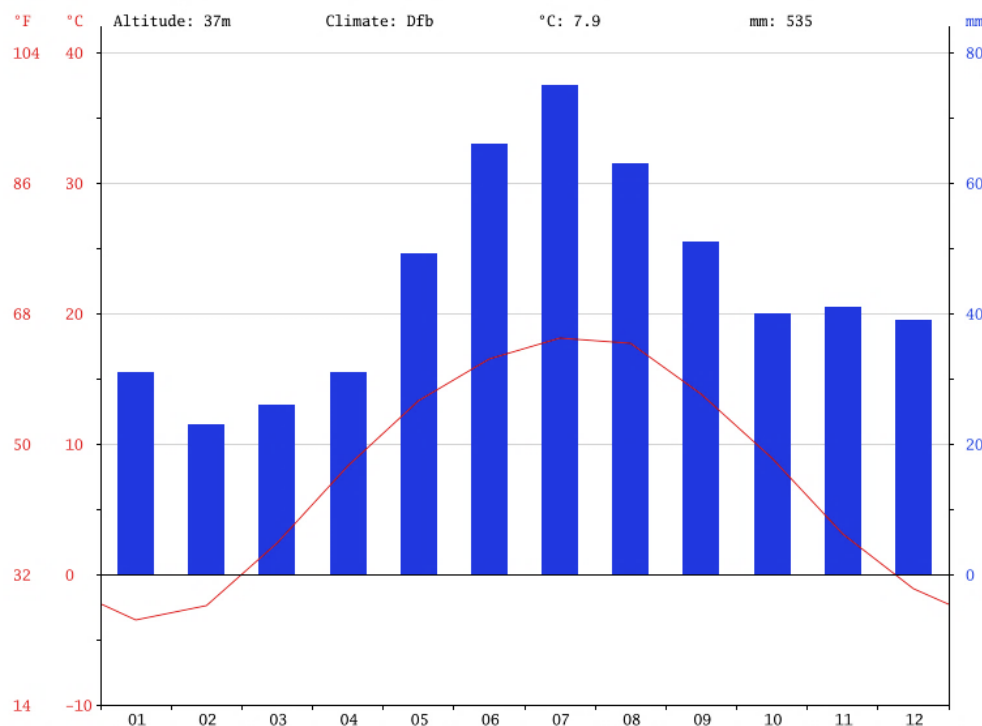
Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” położone jest w granicach pradoliny Toruńsko – Eberswaldzkiej, która przedstawia rozległą formę wklęsłą, oddzielającą pojezierza pomorskie od wielkopolskich. W pomorskiej fazie zlodowacenia był to szlak odpływu wód lodowcowo – rzecznych na zachód, ale geneza tej formy ukształtowania ma predyspozycje wcześniejsze. W strukturze pionowej występuje kilka poziomów akumulacji rzecznej, związanych z etapami kształtowania się odpływu w rytmie wahań klimatu. Liczba tych stopni tarasowych jest niejednakowa w poszczególnych częściach pradoliny. Występuje wyraźna różnica krajobrazowa między zatorzonymi częściami dna pradoliny zajętej przez łąki a jej wyższymi terenami piaszczystymi, na których występują pola wydmowe, porośnięte borami sosnowymi. W kotlinach zachowały się miejscami formy terenu związane z wtargnięciem do istniejącej wcześniej doliny interglacialnej lodowca, który z czasem przekształcał się w płyty martwego lodu, pozostawiającego po sobie jeziora, kemy i ozy (Kondracki, 2009).

Bezpośredni rejon składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” charakteryzuje się regularnym obniżeniem rzędnej powierzchni terenu w kierunku północno-wschodnim ku terasie Wisły, aż do jej koryta. Wartości te maleją od około +60 ÷ +70 m n.p.m., na terenie dawnych ZCh „Zachem” do +55 m n.p.m., w rejonie ul. Nowotoruńskiej i dalej we wsi Łęgnowo do +30 ÷ +35 m n.p.m. Powierzchnia terenu w najbliższym sąsiedztwie bryły składowiska „Zielona”, zbudowanego z 3 mniejszych kompleksów zalega na rzędnej +60 m n.p.m., dla ISO oraz około +65 m n.p.m., dla pozostałych części, nadbudowanych w stosunku do naturalnego poziomu.

4.2. Warunki klimatyczne i meteorologiczne

Bydgoszcz znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego. Na terenie miasta klimat można określić jako kontynentalny pod względem ilości opadów oraz oceaniczny pod względem termicznym. Klimat Bydgoszczy kształtowany jest głównie przez różne odmiany mas powietrza polarnego morskiego, których prawdopodobieństwo wystąpienia wynosi 65%. Opierając się na klasyfikacji klimatu Köppena i Geigera, lokalne warunki klimatyczne został sklasyfikowany jako Dfb, tj. klimat wilgotny kontynentalny z łagodnym latem i opadami rozłożonymi równomiernie w trakcie całego roku. Średnioroczna temperatura dla terenu miasta Bydgoszczy wynosi 7,9°C, a średnia suma opadów atmosferycznych wynosi 535 mm (Rys. 5).

W rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, jak również na całym obszarze dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w zdecydowanej większości dominują tereny leśne, które stanowią rodzaj buforu wymiany powietrza z centrum Bydgoszczy. Omawiany teren poprzemysłowy nie znajduje się zatem pod wpływem tzw. miejskiej wyspy ciepła, a jakość powietrza jest wyższa niż w centrum miasta.



Rys. 5. Wykres klimatyczny miasta Bydgoszczy (źródło: <https://pl.climate-data.org/location/710/>)

4.3. Sieć hydrograficzna i zbiorniki powierzchniowe

Główne ciekі powierzchniowe, które występują w bliskim sąsiedztwie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” to rzeki Wisła i Brda, które stanowią regionalne bazy drenażu wód powierzchniowych i podziemnych. Charakterystyczną cechą zakola Wisły w rejonie Bydgoszczy jest asymetria środowiskowa między terenami położonymi na zachód i wschód od rzeki. Lewobrzeże jest obszarem w granicach Bydgoszczy, silnie przekształconym antropogenicznie. Prawobrzeże (wnętrze zakola) zajmują tereny zalewowe, cenne przyrodniczo. Jakość wód w Wiśle na odcinku bydgoskim w ocenie biologicznej, fizykochemicznej i hydromorfologicznej reprezentuje II klasę. Stan/potencjał ekologiczny jest dobry, podobnie jak stan chemiczny wody. Warto zwrócić uwagę, iż na odpływie Wisły z rejonu dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy stan wody w Wiśle pogarsza się, osiągając stan umiarkowany (WIOŚ, 2015).

Sieć hydrograficzna na obszarze dawnych Zakładów Chemicznych, jest bardzo uboga a wzbogaca ją nieliczne sztuczne wykonane obiekty, tj. sieć rowów odwadniających, osadniki, przepompownie i zbiorniki retencyjne.

Odmierna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do obszaru bezpośrednich teras Wisły i Brdy, gdzie występują liczne naturalne ciekі i sztuczne rowy odwadniające oraz zbiorniki powierzchniowe. W strefie tej na bardzo małej głębokości występują wody podziemne, które okresowo manifestują się bezpośrednio na powierzchni terenu w postaci zalewisk i stref podmokłości.

Na obszarze terasy Wisły zanieczyszczone wody podziemne, genetycznie związane ze składowiskiem odpadów przemysłowych „Zielona”, mogą zatem doprowadzić do zanieczyszczenia płytkich wód

podziemnych, w tym użytkowanych studni kopanych oraz wód powierzchniowych tj. stawów rybnych, małych jeziorzek a także rowów odwadniających.

4.4. Gleby i grunty

Większość gleb w rejonie Bydgoszczy powstała na podłożu z lekkich utworów czwartorzędowych, typu piaszczystych i piaszczysto-gliniastych. Przeważają gleby przebyte pseudobielicowe, wytworzone z wydmywanych piasków luźnych lub słabogliniastych.

Analiza stanu zanieczyszczenia gleb i gruntów, na obszarach poprzemysłowych analogicznych jak teren dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy jest zadaniem stosunkowo trudnym i złożonym. Jest pewne, że jakość gleb i gruntów jest silnie związana z lokalizacją poszczególnych ognisk zanieczyszczeń na obszarze Zakładów, a zatem ma charakter mozaikowy, podobnie jak w przypadku wód podziemnych. Należy dodatkowo zwrócić uwagę, że substancje zanieczyszczające mogą pochodzić zarówno ze znanych jak i dotychczas jeszcze nierozpoznanych ognisk zanieczyszczeń.

W strefie niekorzystnego oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, gleby i grunty są zanieczyszczone:

- a) w strefie przypowierzchniowej – w bezpośrednim sąsiedztwie składowiska i jego bezpośrednim podłożu;
- b) w strefie głębszej – w obrębie chmury zanieczyszczeń przemieszczających się w środowisku gruntowo-wodnym ze składowiska w kierunku doliny Wisły.

W większej odległości od składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” gleby i grunty w strefie przypowierzchniowej zazwyczaj nie są zanieczyszczone. Niemniej nie można wykluczyć występowania stref zanieczyszczonych z innych niezidentyfikowanych dotychczas ognisk.

Do chwili obecnej zarówno w strefie oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” jak również na całym terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy nie były wykonywane badania stanu jakościowego gleb i gruntów o wystarczającym zakresie i skali, które pozwoliłyby na jednoznaczne i wiarygodne rozwiązanie tego problemu. Pilne wykonanie tego typu badań wydaje się bardzo ważne, gdyż pozwoli na wyłączenie obszarów skażonych z kultywacji rolniczej oraz wszelkich form zagospodarowania kumulujących negatywne oddziaływania na okolicznych mieszkańców (np. powstawanie zabudowy mieszkalnej, budowa zbiorników wodnych i in.).

5. BUDOWA GEOLOGICZNA

5.1. Litologia i stratygrafia

5.1.1. Utwory mezozoiczne

Utwory jury górnej występują fragmentarycznie w zachodniej części Zakładów Chemicznych. Litologicznie reprezentowane są przez iłotępki, łupki oraz margle (Kozłowska, 1992), które wyodrębniono na podstawie występujących w nich małży i małżoraczków (Dmoch, 1978).

Utwory kredy reprezentują osady limniczne, brakiczo – morskie oraz morskie, należące do kredy dolnej (berias, walanżyn, hoteryw, apt) oraz górnej (cenoman, turon, santon) (Kozłowska, 1992). Podział poszczególnych pięter opiera się przede wszystkim na różnicach w zespołach mikrofauny. Litologicznie jednak utwory kredy w rejonie Bydgoszczy reprezentowane są głównie poprzez osady wapienne oraz łupki i osady mułowcowo – iłowcowe.

Na obszarze Zakładów Chemicznych „Zachem” strop utworów kredy zalega na rzędnej $-60 \div -40$ m n.p.m. W północno – wschodniej części Zakładów kredę reprezentują piaski drobnoziarniste z przewarstwieniami mułków i mułowców, natomiast na pozostałym obszarze badań występują iły, iłowce, mułki i mułowce z przewarstwieniami piasków, piaskowców i wapieni.

5.1.2. Paleogen

Paleogen reprezentowany jest przez osady oligoceńskie, które zalegają niezgodnie na utworach kredowych. Utwory dolnego oligocenu budują warstwy mosińskie dolne oraz warstwy czempińskie. Górny oligocen to seria piaskowców kwarcowych z wkładkami mułków i węgla brunatnego, charakteryzująca się znaczną miąższością. W bezpośrednim sąsiedztwie Zakładów Chemicznych „Zachem”, paleogen jest reprezentowany jest w przewadze przez iły i mułki, a miąższość tego kompleksu wynosi około $30 \div 50$ m (Kozłowska, 1992).

5.1.3. Neogen

Miocenские utwory neogenu reprezentują warstwy adamowskie, środkowopolskie oraz poznańskie. Warstwy adamowskie budują piaski kwarcowe z muskowitem oraz iły i mułki z przewarstwieniami węgla brunatnego, ponadto szczątki roślin i konkrecje pirytowe. Warstwy środkowopolskie reprezentują nadległe iły i mułki z przewarstwieniami węgla brunatnego. Warstwy te, o miąższości około 12 m, charakteryzują się dużym udziałem rozproszonej substancji organicznej, jak również niezależnie występujących warstw węgla brunatnego, najczęściej ziemistego z okruchami fuzytu. Lokalnie zachowane warstwy poznańskie zbudowane są z utworów ilastych i mułkowatych, w których zachowane są liście, łodygi a nawet całe rośliny (Kozłowska, 1992). Strop utworów zalega na rzędnej $15 \div 30$ m n.p.m.

Osady miocenские w granicach Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy to fragmentarycznie zailone i zamulone piaski drobno- i bardzo drobnoziarniste. Miąższość utworów wynosi około $30 \div 50$ m. W stropie piasków rozpoznano również iły, mułki i węgiel brunatny o miąższości do 10 m.

Pliocieńskie utwory neogenu zachowane są lokalnie. Były wielokrotnie niszczone i deformowane, w związku z czym występują jedynie w postaci profilu osadów o miąższości około 10–20 m. Głębsze warstwy poznańskie górne reprezentują piaski. Nadległe warstwy zaburzone są wkładkami utworów ilastych oraz węgla brunatnego. Utwory pliocenu odsłaniają się na powierzchni na krawędziach doliny Wisły i terasów dolinnych oraz w rejonie Bydgoszczy – Łęgrowa.

W granicach Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy utwory pliocieńskie występują w postaci pstrych iłów i mułków ilastych z przewarstwieniami piasków. Miąższość utworów jest zmienna i zależna od warunków lokalnych, głównie od deniwelacji ich spągu i stropu, które zalega w przedziale rzędnych 30 ÷ 40 m npm.

Granica oddzielająca neogen od czwartorzędu to poligeniczna powierzchnia, na której odsłaniają się osady pliocenu, miocenu lub oligocenu i kredy.

5.1.4. Czwartorzęd

Skomplikowana budowa geologiczna podłoża Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy wynika z dużej zmienności litologicznej (oraz tektonicznej) utworów czwartorzędowych. Utwory czwartorzędowe w rejonie Zakładów są reprezentowane przez osady plejstocenu (czwartorzędu nierozdzielonego) i holocenu. Obszar badań przykryty jest kompleksem utworów czwartorzędowych (Rys. 6) o miąższości od 0 do 170 m.

Rozprzestrzenienie oraz miąższość kompleksu piaszczysto – żwirowego i glin zwałowych wraz z iłami i mułkami są zróżnicowane. W dolinach rzek Wisły i Brdy dominują piaski o różnej granulacji o miąższości od kilku do kilkunastu metrów, przy czym w dolinie Wisły pokryte są namułami i torfami o miąższości do 5 m. W dolinie Brdy miejscami brak osadów czwartorzędowych.

Północno – wschodnia część terasy pradolinnej charakteryzuje się kompleksem piaszczysto – żwirowym, zalegającym na pliocieńskich iłach, o miąższości 15 ÷ 25 m. Kompleks ten przykryty jest nieciągłą warstwą glin zwałowych, licznie porożcinaną wkładkami piasków i mułków, o miąższości do 8 m. Nadległą warstwę stanowią piaski o różnej granulacji o miąższości do 5 m, oraz eoliczne piaski drobnoziarniste.

W granicach Zakładów Chemicznych „Zachem” rozpoznano występowanie dwóch czwartorzędowych dolin kopalnych, w których osady neogenu są silnie zredukowane lub nie występują. Dolina o przebiegu WSW – ENE jest najgłębszą na omawianym terenie i wciną się w utwory kredy do głębokości około 80 m (rzędna około -120 m npm). Jest wypełniona glinami zwałowymi. Druga dolina kopalna, znacznie płytsza, o przebiegu NW-SE wypełniona jest piaskami różnoziarnistymi oraz żwirami i wciną się do rzędnej -30 m npm. Przebieg pozostałych dolin kopalnych jest nieznany, ponieważ do tej pory zostały one rozpoznane jednym lub dwoma wierceniami (Narwojsz, 1989).

Przedstawiony powyżej profil utworów czwartorzędowych tworzą osady trzech zlodowaceń: południowopolskiego, środkowopolskiego i północnopolskiego oraz dwóch okresów interglacialnych: mazowieckiego i eemskiego.

Złodowacenie południowopolskie: Okres złodowacenia południowopolskiego reprezentowany jest przez utwory lodowcowe, wodnolodowcowe. Piaski, żwiry i głazy wodnolodowcowe (subglacialne) zalegają w spągu najstarszego poziomu glacialnego w południowej części obszaru badań, a ich miąższości wynoszą co najmniej 9 m. Zalega na nich warstwa glin zwałowych o miąższości do 17 m z często spotykanymi krami utworów pliocyficznych (iły pstry).

Interglacja mazowiecki: Interglacja mazowiecki (wielki) reprezentują piaski i żwiry rzeczne. W południowo – zachodniej części dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” osady rzeczne występują w głębokiej do 14 m ppt dolinie i sięgają do wysokości 0 m npm. Profil sedimentacji rzecznej został zaburzony i silnie zerodowany podczas interglacji eemskiej. W depresji Bydgoszcz – Czersk (północna część obszaru badań) rozpatrywane osady rzeczne rozcinają serię osadów glacialnych złodowacenia południowopolskiego (amplituda 44 m). Osady młodszych cykli sedimentacji rzecznej uległy erozji podczas interglacji eemskiej. Omawiana seria rzeczna składa się z rytmicznie powtarzających się warstw żwirowych i warstw piasków grubo- i średnioziarnistych (Fert, 1988).

Złodowacenie środkowopolskie: Utwory reprezentujące złodowacenie środkowopolskie to piaski wodnolodowcowe i piaski zwałowe wraz z glinami zwałowymi i wkładkami iłów, mułków i piasków zastoiskowych (subglacialnych). Maksymalne miąższości serii dochodzą do około 68 m.

Interglacja eemski: Osady interglacji eemskiej odpowiadają osadom pra-Brdy. Seria dolna „a” interglacji to warstwa otoczków z drobnym żwirem oraz piaski różnoziarniste ze żwirami i otoczkami oraz żwiry z piaskami i okruchami zwęglonego drewna i piaski gruboziarniste. Seria środkowa „b” reprezentowana jest przez piaski średnio- i drobnoziarniste wraz ze żwirem i otoczkami. Seria górna „c” to utwory piaszczyste drobno- i średnioziarniste z domieszkami piasków gruboziarnistych.

Złodowacenie północnopolskie: Utwory złodowacenia północnopolskiego tworzą osady stadiału sandomierskiego oraz stadiału głównego (faza leszczyńska, faza poznańska). Są to na przemian utwory piaszczyste o różnej granulacji porożcinane wkładkami iłów, mułków oraz glin zwałowych (szczegółowy opis Rys. 6, 7).

Piaski eoliczne stanowią element dominujący w budowie powierzchni Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Przykrywają one powierzchnię terasów pradolinnych i rzecznych w postaci pól piasków przewianych i wydm. Miąższość piasków eolicznych sięga od 5 do 12 m i zwiększa się do 38 m w ukształtowanych formach wydmowych. Litologicznie są to piaski drobno- i średnioziarniste o niewielkiej domieszce frakcji pylastej. Osady te klasyfikowane są jako czwartorzęd nierozdzielony (Kozłowska, 1992).

Osady holocenu występują na obszarze terasów zalewowych Wisły oraz w wąskim pasie wzdłuż Brdy. W obrębie terasów (miąższość 1 – 2 m) występują piaski i żwiry na madach. Są to głównie piaski drobnoziarniste z drobnymi przewarstwieniami piasków średnio- i gruboziarnistych ze żwirami. W dolinie Wisły w głębszych partiach przeważają piaski średnio- i gruboziarniste z przewarstwieniami żwirów. Miąższość osadów dochodzi do 15 m. Lokalnie występują również mułki i iły z domieszką

piasków, namuły piaszczyste i torfiaste oraz piaski i żwiry nasypowe melizn i koryt rzecznych, jak również torfy.

W pobliżu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” zalega kilkumetrowa warstwa utworów piaszczysto – żwirowych podścielona kompleksem glin zwałowych i piasków gliniastych. Warstwa glin zwałowych, glin piaszczystych i piasków gliniastych z drobnymi przewarstwieniami piasku stanowią kompleks o miąższości kilkanaście do kilkadziesiąt metrów. Strop tych utworów sięga rzędnej $48,0 \div 55,1$ m n.p.m., czyli $7,8 \div 14,7$ m p.p.t. w podłożu składowiska „Zielona”. Lokalnie glina zwałowa występuje niemal na powierzchni terenu.

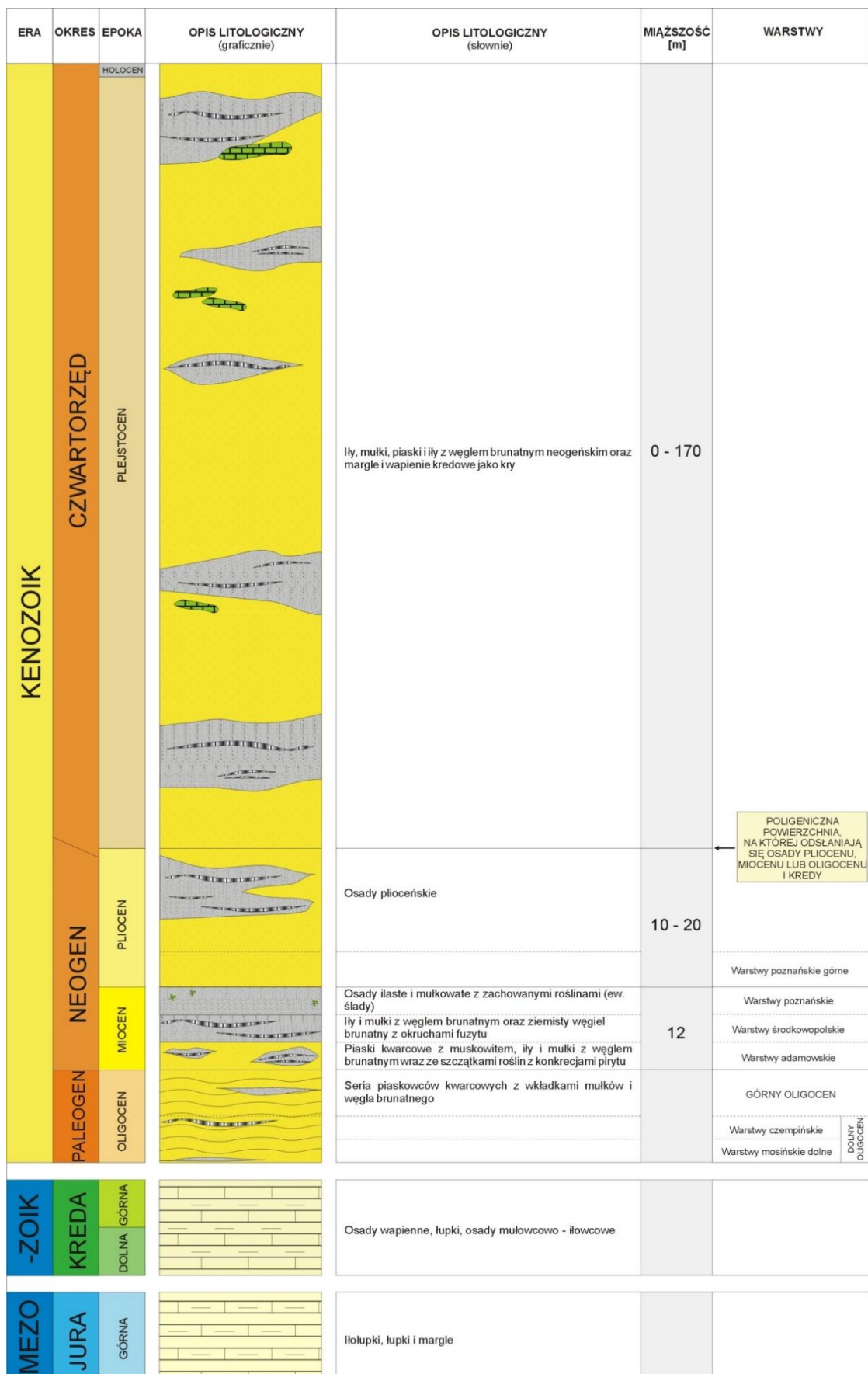
Powyżej omawianych utworów zalega warstwa piasków drobno- i średnioziarnistych o pochodzeniu fluwioglacjalnym oraz osadów piaszczysto – żwirowych. Warstwa ta kontynuuje się, aż do powierzchni terenu za wyjątkiem obszarów przeobrażonych antropogenicznie. W podłożu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” strop utworów piaszczystych rozpoznano na głębokości $5,5 \div 7$ m p.p.t. Lokalnie trudno jednoznacznie wyznaczyć granicę pomiędzy odpadami i pierwotnymi osadami czwartorzędowymi, ze względu na przenikanie deponowanych odpadów o charakterze płynnym w głąb składowiska, jak również wymywanie zanieczyszczeń wraz z wodami infiltrującymi przez składowisko.

Do osadów holocenu zaliczone zostały osady antropogeniczne stanowiące warstwy odpadów o dużej zmienności w pionie i w poziomie. Typy odpadów bezpośrednio zależą od rodzaju produkcji prowadzonej w poszczególnych okresach funkcjonowania Zakładów Chemicznych. Prócz odpadów produkcyjnych rozpoznano gruz budowlany i ceglany oraz fragmenty płyty betonowe, pochodzące z prac rozbiórkowych jak również przewarstwienia piasku i glin. Odpady są składowane w formie luźnej lub w opakowaniach typu big-bag. Na powierzchni terenu zalega warstwa neutralnego osadu piaszczystego, który przykrywa bryłę składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”.

5.2. Tektonika

Położenie Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy (Rys. 8) w obrębie wału pomorskiego ukształtowanego w trakcie zlodowacenia północnopolskiego, odegrało znaczącą rolę w sposobie uformowania osadów czwartorzędowych. Ruch pionowy w górę dźwigający wał pomorski, który rozpoczął się w kredzie górnej, trwał podczas okresu zlodowacenia południowopolskiego i ze zmiennym nasileniem utrzymywał się do końca zlodowacenia środkowopolskiego, a prawdopodobnie do interglacjału eemskiego. Tendencja dźwigania wału pomorskiego spowodowała, iż na omawianym obszarze badań podczas okresów glacialnych akumulowane były osady lodowcowe o zmniejszonej miąższości. Generalnie miąższość osadów czwartorzędowych, poza wyjątkami wywołanymi czynnikami antropogenicznymi, jest niewielka (Kozłowska, 1992). W okresach międzylodowcowych następowało z kolei nasilenie procesów denudacji powierzchniowej.

W okresie interglacjału eemskiego rozwinęła się duża dolina rzeczna. Wody tej rzeki płynęły przez obszar południowo – zachodni w rejonie miasta Bydgoszczy, dalej dopływając do Solca Kujawskiego, gdzie łączyły się ze znaną w literaturze doliną rzeczna pra-Wisły.



Rys. 6. Syntetyczny profil geologiczny rejonu Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy
(Pietrucin, 2015 na podstawie Kozłowska, 1992)

ERA	OKRES	EPOKA	OPIS LITOLOGICZNY (graficznie)	OPIS LITOLOGICZNY (słownie)	MIAŻSZOŚĆ [m]	ZŁODOWACENIE / INTERGLACJAŁ	FAZA / SERIA	
KENOZOIK	CZWARTORZĘD	HOLOCEN		Piaski i żwiry deluwialne				
		CZWARTORZĘD NIERÓZDZIELONY		Eluwia piaszczyste glin zwałowych	0,5 - 2			
		PLEJSTOCEN		Piaski eoliczne, drobno- i średnioziarniste o niewielkim zapyleniu	5 - 12	ZŁODOWACENIE PÓŁNOCNOPOLSKIE	FAZA POZNAŃSKA	
				Piaski wodnolodowcowe	max. 5			
				Gliny zwałowe	10 - 15			
				Piaski drobnoziarniste, ku stropowi zwiększa się średnia ziarna do piasków gruboziarnistych z domieszkami żwirów do żwirów wodnolodowcowych	8			
				Piaski drobnoziarniste mulkowe z ilami i mulkami	6			
				Piaski drobnoziarniste oraz piaski mulkowe i mulki kemów	max. 17			
				Gliny zwałowe oraz kry osadów neogeńskich	2 - 15			
				Iły, mulki i piaski pyłowe zastoiskowe	7			
				Piaski drobnoziarniste i pyłowe i średnioziarniste z niewielkimi przewarstwieniami osadów piaszczystych grubszych frakcji ze żwirami wodnolodowcowymi	max. 25			
				Piaski ze żwirami, żwiry i glazy moren czołowych	10			
				Gliny zwałowe	18,3			
				Piaski średnio-, różno- i gruboziarniste, wodnolodowcowe ze żwirami i otoczkami ze sporadycznymi piaskami drobnoziarnistymi	11,3			
				Piaski drobno- i średnioziarniste z domieszkami gruboziarnistych	6 - 15	INTERGLACJAŁ EEMSKI	SERIA GÓRNA	osady pra Bldy
				Piaski średnio- i drobnoziarniste z pojedynczymi żwirami i otoczkami	5		SERIA ŚRODKOWA	
				Piaski różnoziarniste z domieszką żwiru i otoczek	3		SERIA DOLNA	
				Żwir z piaskami i otoczkami Warstwa otoczek z drobnym żwirem oraz piaski różnoziarniste ze żwirami i otoczkami; żwiry z piaskami i okruciami zwęglonego drewna i piaski gruboziarniste	0 - 9			
				Piaski i mulki zastoiskowe, subglacialne piaski drobnoziarniste mulkowe z warstwami mulków oraz występujące sporadycznie piaski drobnoziarniste	max. 33,2	ZŁODOWACENIE ŚRODKOWOPOLSKIE		
				Piaski różnoziarniste ze żwirami i dużymi otoczkami oraz żwiry wraz z drobnymi przewarstwieniami piaszczystymi lub osadów neogenu				
				Gliny zwałowe ze sporadycznymi, drobnymi przewarstwieniami piaszczystymi lub osadami neogenu	2 - 26			
				Piaski drobnoziarniste wodnolodowcowe	2 - 8	INTERGLACJAŁ MAZOWIECKI		
				Rytmicznie powtarzające się warstwy żwirów i warstwy piasków rzecznych grubo- i średnioziarnistych	14			
				Bruki i żwiry rezydualne	2-3	ZŁODOWACENIE POŁUDNIOWOPOLSKIE		
				Gliny zwałowe z krami łów pstrych lub zaburzone iły pstry przemieszane z glinami zwałowymi	17			
				Piaski różnej granulacji oraz żwiry z glazami wodnolodowcowymi, subglacialnymi z przewarstwieniami glin zwałowych	min. 9			

Rys. 7. Syntetyczny profil geologiczny utworów czwartorzędowych rejonu Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy (Pietrucin, 2015 na podstawie Kozłowska, 1992)

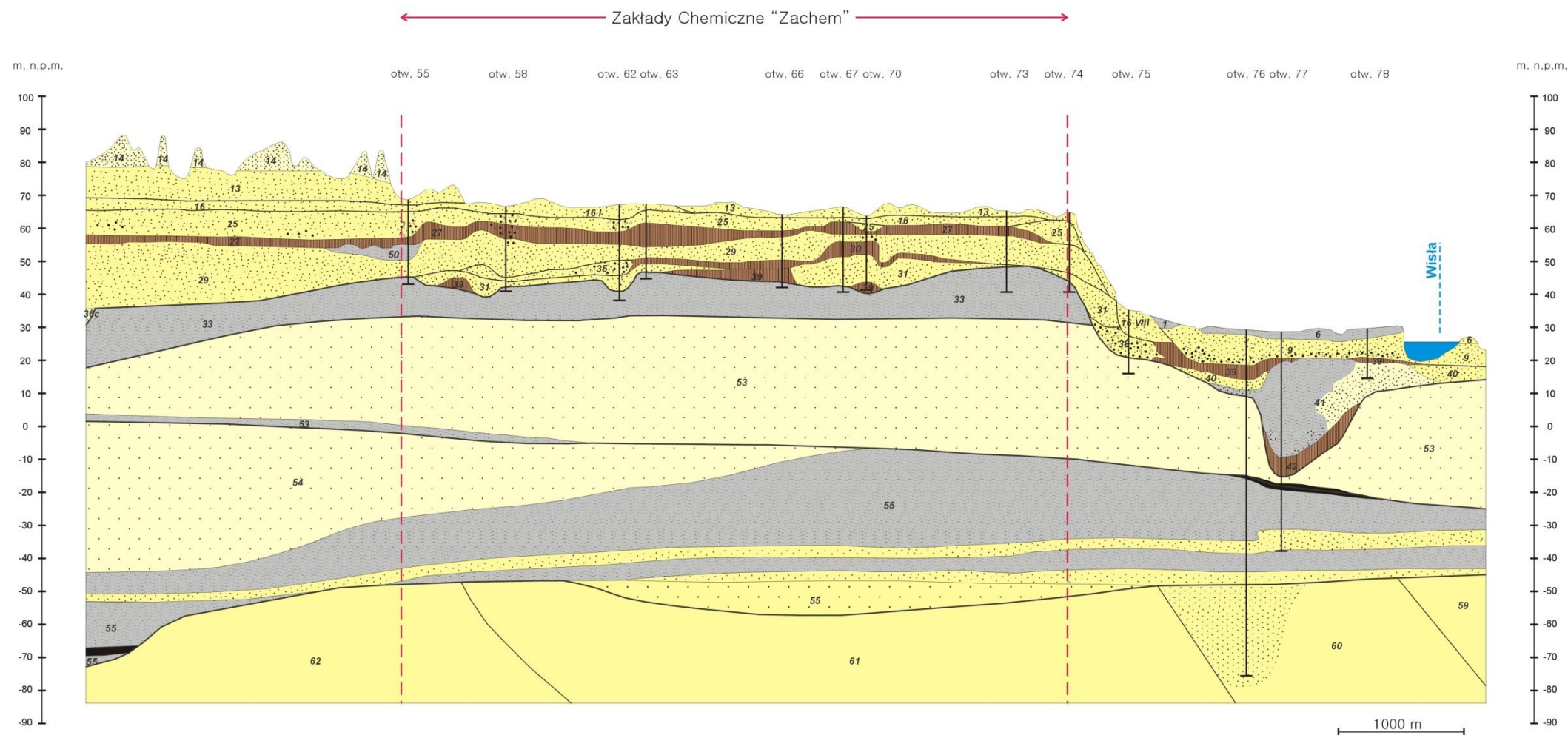
Depresje tektoniczne powstały w najbardziej dynamicznym okresie tektonicznym, jaki przypadał na okres zlodowacenia południowopolskiego. Skutkiem procesów tektonicznych było utworzenie się szeregu uskoku, które uformowały dwie niewielkie powierzchniowo depresje tektoniczne: jedna w Bydgoszczy – Czersku, druga w Bydgoszczy – Fordonie. Ruchy opadające tych depresji zachodziły falowo z różną intensywnością. Suma ruchu ujemnego w depresji Bydgoszcz – Czersk podczas zlodowacenia południowopolskiego, interglacjału mazowieckiego i zlodowacenia środkowopolskiego wynosiła około 65 m. Z tego na okres zlodowacenia południowo – polskiego przypada co najmniej połowa wspomnianej wartości. Opadanie dna depresji nie było równomierne. Południowo – zachodnia część depresji ma amplitudę ruchu większą niż część północno – wschodnia (Kozłowska, 1992).

Procesy glacitektoniczne w rejonie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” odegrały znacznie mniejszą rolę w formowaniu się profilu utworów czwartorzędowych. W starszych okresach glacialnych zaburzeniu ulegały osady neogenu, co uwidacznia się w formach występowania wychodni osadów pliocenu w podłożu czwartorzędowym. Późniejsze fazy erozji, podczas których powstawały terasy pradolinne, prowadziły do destrukcji form glacitektonicznych, co istotnie utrudnia odczytanie ich wielkości, rozmiarów i wieku (Kozłowska, 1992).

Objaśnienia do Rys. 8:

1 – tQ_h torfy; 6 – maQ_h mułki i ił, miejscami z domieszką piasków (mady); 9 – ${}^{f_pz}Q_h^t$ piaski i żwiry rzeczne teras zalewowych; 13 – eQ piaski eoliczne; 14 – Q^w piaski eoliczne w wydmach; 16 – ${}^{f_pz}Q_{p4}^{2tl-tVIIIb}$ piaski ze żwirami rzeczne teras nadzalewowych (I, IIa, IIb, III, IV, V, VI, VII, VIIIa, VIIIb); 25 – ${}^{fg}Q_{p4}^{2P}$ piaski ze żwirami wodnolodowcowe; 27 – ${}^gQ_{p4}^{2L}$ gliny zwałowe; 29 – ${}^{fg}Q_{p4}^{2L}$ piaski ze żwirami wodnolodowcowe (miejscami rzeczne); 30 – ${}^gQ_{p4}^1$ gliny zwałowe; 31 – ${}^{fg}Q_{p4}^1$ piaski ze żwirami wodnolodowcowe; 33 – ${}^{im}PL_{1p3}$ iły, mułki, lignit i węgiel brunatny – warstwy poznańskie górne; 35 – ${}^{gc}Q_{p4}^1$ piaski ze żwirami, żwiry i głązy moren czołowych; 36 – ${}^{fg}Q_p$ 3-4 piaski i żwiry rzeczne (c – cykl sedymentacyjny); 39 – ${}^gQ_{p3}^2$ gliny zwałowe; 40 – ${}^{fg}Q_{p3}^2$ piaski wodnolodowcowe; 41 – ${}^bQ_{p3}^1$ iły, mułki i piaski zastoiskowe; 42 – ${}^gQ_{p3}^1$ gliny zwałowe; 50 – ${}^{Tr,Cr}Q$ iły, mułki, piaski i iły z węglem brunatnym trzeciorzędowe oraz margle i wapienie kredowe jako kry w utworach czwartorzędowych; 53 – ${}^pM_{3a}$ piaski kwarcowe oraz iły i mułki z przewarstwieniami węgla brunatnego – warstwy adamowskie; 54 – pOl_3 piaski kwarcowe z wkładkami mułków i węgla brunatnego; 55 – mOl_1 m+cż mułki ilaste, mułowcowe, iły i iłowce z glaukonitem – warstwy mosińskie i czempińskie nierozdzielone; 59 – ${}^pCr_{al}$ piaski z fosforytami i glaukonitem oraz margle; 60 – pCr_h piaski i iłowce piaszczysto – margliste; 61 – mCr_v mułowce, mułowce i iłowce z syderytami; 62 – ${}^{mc}Cr_b$ mułowce, mułki, iłowce margliste, wapienie i piaskowce

PRZEKRÓJ GEOLOGICZNY



Rys. 8. Przekrój geologiczny w rejonie Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy (Pietrucin, 2015 na podstawie Kozłowska, 1992)

6. WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

6.1. Czwartorzędowe piętro wodonośne

Złożona budowa geologiczna rejonu dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy implikuje skomplikowane warunki krążenia wód podziemnych. Sytuacja ta szczególnie widoczna jest w czwartorzędowym piętrze wodonośnym. Generalny kierunek przepływu wód odbywa się ku regionalnym bazom drenażu, tj. w kierunku północnego wschodu do Wisły oraz na północy do jej lewobrzeżnego dopływu - Brdy.

Czwartorzędowa warstwa wodonośna występuje na obszarze objętym badaniami i była ujmowana w Zakładach Chemicznych „Zachem” do celów pitnych i technologicznych. Utwory budujące warstwę związane są genetycznie z interglacją mazowiecką i utworami fluwioglacjalnymi. Są to utwory o silnie zróżnicowanej granulacji od piasków pylastych po żwiry. Zasilanie warstwy odbywa się poprzez infiltrację wody podziemnej z warstwy nadległej, przypowierzchniowej oraz infiltrację opadów atmosferycznych. Główny obszar zasilania znajduje się na zachodzie i południowym zachodzie w stosunku do terenu Zakładów Chemicznych, w obrębie pokrytej wydłami terasy pradolinnej (Narwojsz, 2007). Zwierciadło wody podziemnej ma charakter swobodny, lokalnie lekko naporowy. Strumień wody rozdziela się i przemieszcza w kierunku północnym, ku Brdzie, wzdłuż osi doliny kopalnej wypełnionej piaskami i żwirami (rejon dW XI) oraz w kierunku wschodnim i północno – wschodnim ku dolinie Wisły (rejon dW IX). Kierunki przepływu wód podziemnych w warstwie zaburzone są przez strefy o zwiększonej przewodności, ujęcie wody „S”, które wytwarza lokalny lej depresji, jak również strefy, w których omawiana warstwa nie występuje.

Na obszarze dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy i w ich bezpośrednim sąsiedztwie wyznaczono strefy bez warstwy wodonośnej reprezentującej piętro czwartorzędowe. Pierwszą z nich jest strefa na północ od obszaru badań, gdzie znacznej miąższości gliny zwałowe wypełniają sięgającą osadów kredowych dolinę kopalną. Rejon ten ogranicza przepływ wód podziemnych, w kierunku północnym ku dolinie Brdy. Drugą strefą na północ od rejonu dW XI jest granica dolin Wisły i Brdy. Osady neogenu nie uległy tu erozji podczas czwartorzędu. Lokalnie rozpoznano również brak warstwy wodonośnej w centralnej części Zakładów Chemicznych. Strefa znacznego utrudnienia przepływu wód podziemnych zlokalizowana jest pomiędzy składowiskiem „Lisia”, a składowiskiem odpadów przemysłowych „Zielona”. Utrudnia ona dopływ wód z południa do rejonu dW XI.

Miąższość czwartorzędowej warstwy wodonośnej wynosi $15 \div 20$ m, natomiast w rejonie obniżień, dolin kopalnych może dochodzić do 80 m. Współczynnik filtracji wynosi $0,7 \times 10^{-4} \div 7,6 \times 10^{-4}$ m/s, przy średniej $1,5 \times 10^{-4}$ m/s. Wydatek jednostkowy otworów ujmujących warstwę wynosi $10 \div 15$ m³/h·1m, miejscami przekracza 30 m³/h·1m. Najwyższe wartości przewodności warstwy 40 m²/h związane są z doliną kopalną wypełnioną piaskami o różnej granulacji, gdzie miąższość wynosi 60 m (Narwojsz, 2007). Prędkości rzeczywiste przepływu wody podziemnej w warstwie wodonośnej wynoszą $2,85 \times 10^{-6} \div 4,9 \times 10^{-6}$ m/s. Maksymalną prędkość rzeczywistą stwierdzono natomiast w otworze P6S na północ od ujęcia „S” w osi doliny kopalnej i wyniosła $6,9 \times 10^{-6}$ m/s (Narwojsz, 1989; 2007).

W Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy obserwuje się systematyczne obniżanie się poziomu zwierciadła wody podziemnej w czwartorzędowym piętrze wodonośnym. Przy czym tendencja ta ma charakter regionalny (Narwojsz, 2007). Wspomniane powyżej zmiany należy wiązać ze zmniejszeniem zasilania utworów czwartorzędowych. Spowodowane jest to likwidacją bądź znacznym ograniczeniem sztucznego zasilania zarówno na terenie Zakładów jak i poza nimi. Zaprzestano bowiem eksploatacji dołów składowych aniliny, stawu osadowego EPI (SOE), podjęto działania ograniczające wycieki z sieci kanalizacyjnej i wodociągowej. W roku 2013 po ogłoszeniu upadłości przez następcę prawnego Zakładów, Infrastrukturę Kapuściska S.A., zaprzestano całkowicie wszelkiej eksploatacji przemysłowej. Poza granicami obszaru badań, pod koniec roku 2004 wyłączono również z eksploatacji pola irygacyjne, eksploatowane przez przedsiębiorstwo Miejskie Wodociągi i Kanalizacja Sp. z o.o. w Bydgoszczy.

6.2. Neogeńskie piętro wodonośne

Głównym poziomem wodonośnym piętra neogeńskiego jest poziom mioceński, który występuje w piaskach pylastych, drobno- i średnioziarnistych. Izolowany jest od piętra czwartorzędowego i kredowego warstwą słabo przepuszczalnych iłów. Lokalnie jednak, w dolinie Wisły i obrębie doliny kopalnej, łączy się z piaskami czwartorzędowymi tworząc jeden, neogeńsko – czwartorzędowy poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym. (Narwojsz, 1989). Na pozostałym obszarze Zakładów, zwierciadło wody podziemnej neogeńskiego piętra wodonośnego ma charakter naporowy (0,3 MPa) w związku z nadległymi iłami plioceńskimi, a stabilizuje się na rzędnej 35 ±50 m npm (Narwojsz, 2007). W rejonie doliny Wisły zwierciadło zmienia charakter na subartezyjski (Kozerski, 2000). Zasilanie omawianego piętra odbywa się poprzez infiltrację z nadległego piętra czwartorzędowego bądź poprzez bezpośrednią infiltrację opadów w dolinie Wisły i w obrębie wypełnionych piaskami, czwartorzędowych dolin kopalnych. Według danych literaturowych zasilanie piętra neogeńskiego wynosi 1,93 m³/h·km².

Mięszkość wodonośnych utworów piętra neogeńskiego jest zróżnicowana i wynosi do 60 m (średnio 30 m). Charakterystyczną cechą jest stosunkowo istotna zmienność parametrów hydrogeologicznych. Współczynnik filtracji wynosi 0,6×10⁻⁵ ÷ 2,0×10⁻⁴ m/s, a przewodność warstwy 0,4 ÷ 40,0 m²/h. Wydatek jednostkowy pojedynczych studni wynosi 0,1 ÷ 6,6 m³/h·1m (Narwojsz, 1989; 2007).

Piętro neogeńskie na obszarze Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy zostało zbadane w otworach 15/900 oraz S15. Wody podziemne zostały uznane za nieprzydatne do eksploatacji, ze względu na niski współczynnik filtracji (3,0×10⁻⁵ m/s) oraz wydatek jednostkowy (1 m³/h·1m) (Narwojsz, 2007).

W rejonie Zakładów Chemicznych „Zachem” dolina Wisły stanowi najbardziej rozległą strefę kontaktu hydraulicznego. Na obszarze tym dominuje jedno neogeńsko – czwartorzędowe piętro wodonośne.

6.3. Kredowe piętro wodonośne

Kredowe piętro wodonośne zbudowane jest z dwóch poziomów: dolnokredowego - występującego w obrębie piasków i piaszczaków oraz górnokredowego - związanego z utworami węglanowymi.

Utwory te tworzą poziomy o wodach porowych, szczelinowych i szczelinowo – porowych. Poziomy wodonośne są lokalnie izolowane iłowcami i mułowcami dolnego cenomanu. W związku jednak z nieciągłą izolacją oba poziomy tworzą wspólny układ hydrodynamiczny krążenia wód (Kozerski, 2000).

Głównym poziomem wodonośnym, powszechnie eksploatowanym w Bydgoszczy jest poziom dolnokredowy. Zwierciadło wody podziemnej ma charakter naporowy i stabilizuje się na rzędnej $43 \div 45$ m n.p.m. (Narwojsz, 2007). Zasilanie poziomu odbywa się poprzez infiltrację wód z poziomów nadległych, a w dolinie Wisły stwierdzono wpływ zmineralizowanych wód podziemnych głębokiego systemu krążenia. Objawia się on wzrostem stężeń jonów chlorkowych i siarczanowych. W dolnokredowym poziomie wodonośnym wydzielono dwie warstwy dolną i górną. Rozdzielone są one serią mułowcowo – piaszczystą z iłami i iłowcami hoterywu o zróżnicowanej wodonośności lub też w przypadku jej braku pozostają ze sobą w łączności (Kozerski, 2000).

Warstwa dolna poziomu dolnokredowego zbudowana jest z piaskowców i piasków walanżynu. Charakteryzuje się miąższością $60 \div 120$ m oraz dobrymi parametrami hydrogeologicznymi. Wartość współczynnika filtracji wynosi $1,0 \times 10^{-4} \div 2,61 \times 10^{-4}$ m/s, zaś przewodność warstwy średnio około $65 \text{ m}^2/\text{h}$. Wydajność studni może osiągać wartości $150 \div 250 \text{ m}^3/\text{h}$, a wydatek jednostkowy wynosi $1,2 \div 25,0 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1\text{m}$ (Kozerski, 2000).

Warstwa górna poziomu dolnokredowego zbudowana jest z utworów bar remu i albu, litologicznie związana z piaskami i piaskowcami. Miąższość warstwy wynosi $40 \div 80$ m, przy współczynniku filtracji $5,56 \times 10^{-5} \div 1,39 \times 10^{-4}$ m/s oraz przewodności $20 \text{ m}^2/\text{h}$ (Kozerski, 2000).

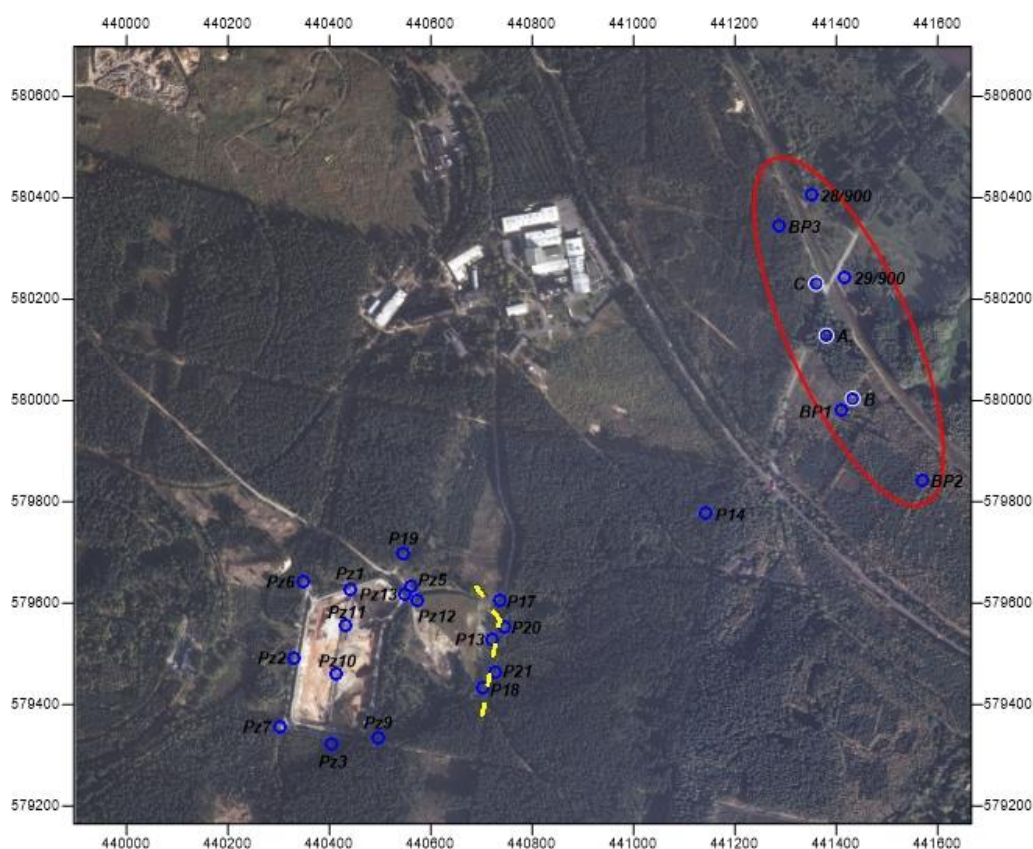
Górnokredowy poziom wodonośny zbudowany jest z margli, opok, wapieni i geżów cenomanu po mastrycht. Zwierciadło wody podziemnej ma charakter naporowy. Zasilanie poziomu odbywa się w rejonach wysoczyzny poprzez infiltrację wód z poziomów nadległych. W dolinie Wisły zwierciadło wody poziomu górnokredowego ma charakter artezyjski. Parametry hydrogeologiczne tych utworów są bardzo zróżnicowane, gdzie wydatek jednostkowy studni wynosi $0,4 \div 20,0 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1\text{m}$ (Kozerski, 2000).

6.3.1. Warunki występowania i przepływu wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”

W rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” stwierdzono występowanie czwartorzędowego piętra wodonośnego we fluwiogłacjalnych piaskach drobno- i średnioziarnistych oraz żwirach. Warstwa utworów przepuszczalnych związana jest z obniżeniem stropu zalegających głębiej utworów słabo przepuszczalnych – glin zwałowych i iłów. Zwierciadło wód podziemnych ma charakter swobodny, a kierunki przepływu są determinowane poprzez występujące wypiętrzenia i wkładki utworów słabo przepuszczalnych. Generalny kierunek przepływu wód odbywa się w kierunku północnego wschodu i wschodu, ku dolinie Wisły (Smarzyński, 2005). Miąższość warstwy wodonośnej w rejonie składowiska „Zielona” wynosi około kilku - kilkunastu metrów. Współczynnik filtracji utworów piaszczystych zawiera się w granicach $4,0 \times 10^{-5} \div 1,69 \times 10^{-4}$ m/s (Smarzyński, 2005).

Elementami zaburzającymi naturalne kierunki przepływu wód podziemnych w rejonie składowiska są ujęcie barierowe oraz przesłona przeciwiłtracyjna wraz z systemem drenażowym zlokalizowane na wybiegu chmury zanieczyszczeń, tj. na północny wschód od składowiska (Rys. 9).

Ujęcie barierowe mające na celu przechwytywanie zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” zostało wykonane w latach 1991 do 1992. Zlokalizowane jest w odległości około 800 ÷ 1000 m w kierunku na wschód od granicy Zakładów Chemicznych, w rejonie skrzyżowania ul. Płatnowskiej i linii kolejowej Bydgoszcz – Toruń.



Rys. 9. Lokalizacja składowiska „Zielona” oraz elementów instalacji wykonanych w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia, przedstawiona na ortofotomapie

Legenda: żółta przerywana linia – przesłona przeciwiłtracyjna tzw. ścianka szczelna (lokalizacja wg Smarzyński, 2005), obszar zakreślony czerwoną linią – rejon ujęcia barierowego, niebieskie punkty – studnie i piezometry

Ujęcie zbudowane było pierwotnie z trzech studni A, B i C o głębokości od 19,0 do 23,5 m oraz otworów obserwacyjnych BP1, BP2 i BP3. Wydajność eksploatacyjną ujęcia barierowego zatwierdzono na 85 m³/h przy depresji 4,0 m (Ułanowicz, 1992). W pozwoleniu wodno-prawnym dozwolony pobór wody z niewiadomych przyczyn ustalony został jednak na 30 m³/h i 700 m³/d (Smarzyński, 2005). Pod względem formalnym ujęcie pracowało w ramach zasobów eksploatacyjnych ujęcia wody chłodniczej rejonu d900 Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Po roku 1996, w związku ze znacznym spadkiem wydajności studni A, zlikwidowano ją a w roku 1997 wykonano otwór zastępczy A₁ (Zaleski, 1997).

Ujęcie barierowe zostało zaprojektowane i wykonane w celu przechwycenia zanieczyszczonych wód podziemnych odpływających w kierunku wschodnim i północno – wschodnim ze składowiska

odpadów przemysłowych „Zielona”. Mimo silnego zanieczyszczenia wód podziemnych i realnego zagrożenia społeczności lokalnej zamieszkającej obszar zlokalizowany na odpływie wód do Wisły, eksploatacja ujęcia odbywała się wyłącznie w okresie od 1 kwietnia do 15 listopada. W pracy ujęcia notowane były również przestoje wywołane głównie przez przerwy w dostawie energii elektrycznej, ale również związane z awariami sprzętowymi.

Parametry techniczne poszczególnych studni i piezometrów wchodzących w skład ujęcia barierowego przedstawione zostały w poniższej tabeli (Tab. 3).

Tab. 3. Parametry techniczne studni ujęcia barierowego na rok 2005 (Smarzyński, 2005)

Parametr / Otwór	Studnie ujęcia barierowego			Piezometry monitoringowe		
	A ₁	B	C	BP1	BP2	BP3
Głębokość [m]	20,5	19,0	23,5	26,0	26,0	25,5
Mięszość warstwy wodonośnej [m]	15,0	13,5	16,0	22,0	>22,5	17,5
Filtr	Siatkowy 11¾"	PVC Pressag 280 mm	PVC Pressag 280 mm	PVC Pressag 165 mm	PVC Pressag 165 mm	PVC Pressag 165 mm
Długość filtra [m]	5,0	3,0	6,0	4,0	4,0	4,0
Wydajność maksymalna [m³/h]	28,4	15,0	40,0	-	-	-
Depresja [m]	3,4	3,5	4,0	-	-	-
Współczynnik filtracji [m/s]	2,03×10 ⁻⁴	1,97×10 ⁻⁴	3,25×10 ⁻⁴	-	-	-

Odpompowywane z ujęcia barierowego wody podziemne kierowano do zakładowej sieci kanalizacyjnej i dalej do Centralnego Zbiornika Uśredniania Ścieków (CZU). Wkrótce po uruchomieniu ujęcia barierowego w 1992 roku okazało się, że ciągła eksploatacja w założonym okresie kwiecień – listopad i tak nie jest możliwa. Zrzut silnie zanieczyszczonych wód do sieci kanalizacyjnej, w sytuacji, gdy znajdowały się w niej ścieki o odczynie kwaśnym, powodował bowiem silną emisję siarkowodoru do atmosfery. Intensyfikacja procesu zachodziła w kolektorach kanalizacyjnych, kaskadach oraz nieistniejącym już obecnie CZU, przy stężeniu sumy siarkowodoru i siarczków ($H_2S + S^{2-}$) wynoszącym 30 do 40 mg/L (Smarzyński, 2005).

Problemy z bezpiecznym odprowadzaniem wód z ujęcia spowodowały, że w latach 1992 do 1994 było ono eksploatowane bardzo nierównomiernie (warunkiem pracy ujęcia był neutralny lub zasadowy odczyn ścieków w punkcie zrzutu wód z ujęcia barierowego do kanalizacji). Dobowy czas pracy ujęcia wahał się wtedy od kilkunastu minut do kilkunastu godzin. Średnia wydajność godzinowa poszczególnych studni w latach 1992 do 1994 wynosiła: A – 15,4 m³/h, B – 13,7 m³/h i C – 30,5 m³/h. Z ujęcia odpompowano w tym okresie około 117,5 tys. m³ zanieczyszczonej wody (Smarzyński, 2005). Dla uniknięcia problemów z emisją siarkowodoru, Wydział Badawczy Zakładów Chemicznych „Organika – Zachem”, opracował technologię oczyszczania wód pochodzących z ujęcia barierowego, która polegała na utlenianiu siarczków (S^{2-}) do siarczanów (SO_4^{2-}) z wykorzystaniem podchlorynu sodu na katalizatorze Rang 19 (Technologia, 1993). Katalizator ten jest tlenkową formą katalizatora niklowego typu współstrąceniowego.

Brak jest szczegółowych danych charakteryzujących pracę samej podczyszczalni ścieków, tj. Centralnego Zbiornika Uśredniania Ścieków (CZU). Jednak już w roku 2005 podczas konferencji

naukowej Współczesne Problemy Hydrogeologii, w przewodniku sesji terenowej „Hydrogeologia Kujaw i Dolnego Powiśla” pracownicy Wydziału Ochrony Środowiska ZCh „Zachem” wspominają o „nieistniejącym obecnie Centralnym Zbiorniku Uśredniania Ścieków (CZU)”.

W oparciu o wykonany w 1995 r. model matematyczny filtracji [pisownia oryg.] ujęcia barierowego zalecono zmniejszenie wydajności ujęcia do około 25 - 30 m³/h oraz ograniczenie do minimum poboru ze studni B. Po roku 2008, zgodnie z zaleceniami autorów modelowania zaprzestano odprowadzania zanieczyszczonych wód podziemnych ze studni B ujęcia barierowego (Kuberski, 2009). Analiza dostępnych danych w zakresie eksploatacji ujęcia barierowego wskazuje jednak, że już od 2000 r. studnia B najprawdopodobniej nie była używana. Około 2010 r. zaprzestano eksploatacji studni A₁ a w 2015 r. nie podjęto żadnych działań w zakresie uruchomienia ostatniej czynnej studni C. W ostatnim okresie eksploatacji ujęcia barierowego ilość odpompowywanych wód była bardzo niska i wynosiła tylko około 10 – 50 tys. m³/rok a dodatkowo w 2013 r. ujęcie w ogóle nie zostało włączone do użytku.

Aktualnie we wszystkich studniach ujęcia nie ma infrastruktury w postaci pomp oraz zasilania, rurociągi do odprowadzania wody znajdują się natomiast w stanie dobrym. W związku dostępem osób postronnych do pozostawionych otworów studziennych zostały one zdewastowane w związku z kradzieżami elementów metalowych. Stan samych otworów studziennych nie jest znany i wymaga przeprowadzenia ich kamerowania, ale w związku z dłuższym postojem mogą one nie nadawać się do dalszego wykorzystania.

W roku 2003, w związku z niesatysfakcjonującymi efektami eksploatacji ujęcia barierowego, wykonano drenaż wzdłuż ul. Zielonej na terenie Zakładów Chemicznych w ramach I etapu prac nad efektywnym przejmowaniem zanieczyszczeń z rejonu składowiska. W kolejnym etapie w roku 2004, w ramach kontynuacji zadania, rozpoczęto wykonywanie szczelnej przesłony przeciwfiltracyjnej (tzw. ścianki szczelnej), która miała, przynajmniej w teorii, uniemożliwić migrację zanieczyszczonych wód podziemnych poza teren Zakładów. W lutym 2005 roku zakończono ww. prace.

System przejmowania zanieczyszczeń z rejonu składowiska „Zielona” składa się ze szczelnej przesłony, wykonanej z zastosowaniem technologii kolumn DSM (ang. deep soil mixing) oraz jet-grouting’u (Andrzejewski, 2011) i ułożonego równolegle do niej drenażu odprowadzającego zanieczyszczone wody podziemne przez pompownię do kanalizacji zakładowej. Głębokość przesłony wg danych z projektu technicznego wynosi 10-11 m i powinna być ona dociągnięta do stropu słabo przepuszczalnych glin zwałowych.

System drenażowy wykonany został na głębokości około 5 m ale zasadniczo nie są dostępne jakiegokolwiek dane dotyczące jego eksploatacji. Jak się można domyślać dla jego poprawnego funkcjonowania konieczna była nieprzerwana praca przepompowni, która zapewne została zatrzymana w ramach likwidacji dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Należy zwrócić uwagę, że w warunkach nieprzejmowania zanieczyszczonych wód przed barierą przeciwfiltracyjną zachodzi zjawisko jej „opływania” także stanowi ona jedynie element modyfikujący przepływ wód podziemnych i nie zatrzymuje migracji zanieczyszczeń.

W celu monitorowania poprawności działania przesłony przeciwfiltracyjnej wykonano dwa otwory obserwacyjne (piezometry P20, P21) za przesłoną, na kierunku odpływu wód podziemnych. Badania realizowane we wspomnianych piezometrach dowiodły, iż instalacja bardzo słabo lub w ogóle nie wywiązuje się ze swej roli. Zanieczyszczenia migrują bowiem nadal w kierunku północno – wschodnim co sugeruje, że przesłona nie została dogłębiona do glin zwałowych stąd nie stanowi ona skutecznej bariery dla przepływu zanieczyszczeń.

6.4. Hydrogeologiczny model numeryczny rejonu dawnych ZCh „Zachem”

Komputerowe modelowanie warunków występowania i przepływu wód podziemnych należy do głównych narzędzi badawczych stosowanych do rozwiązywania skomplikowanych problemów hydrogeologicznych. Symulacje komputerowe przepływu wód podziemnych w systemach wodonośnych wykorzystują równanie matematyczne przepływu cieczy przez ośrodek porowy. Ma ono postać równania różniczkowego II rzędu, gdzie wartość ciśnienia H jest zmienną zależną:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(K_{xx} \frac{\delta H}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_{yy} \frac{\delta H}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_{zz} \frac{\delta H}{\delta z} \right) = S_s \frac{\delta H}{\delta t} \pm W$$

gdzie: K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – współczynniki filtracji odpowiednio w kierunku osi X , Y i Z ; H – ciśnienie wód podziemnych; W – strumień jednostkowy (tj. wydatek q przypadający na jednostkową objętość): znak ujemny – drenujący, znak dodatni – zasilający; S_s – współczynnik odsączalności sprężystej dla ośrodka porowego; t – czas.

Dla uzyskania jednoznacznego rozwiązania takiego równania konieczne jest podanie wartości parametrów hydrogeologicznych odwzorowywanego systemu wodonośnego oraz określenie warunków brzegowych wokół analizowanego obszaru filtracji. Warunki te odnoszą się do ciśnienia H (zmiennej zależnej), bądź też jego pochodnych (głównie Q – wydajności lub przepływu).

6.4.1. Konceptualny model hydrogeologiczny rejonu składowiska „Zielona”

Komputerowe modelowanie warunków występowania i przepływu wód podziemnych polega na stworzeniu wirtualnego modelu rzeczywistego środowiska ich występowania tj. warstwy lub układu połączonych ze sobą warstw wodonośnych. Wirtualny, komputerowy model systemu wodonośnego odwzorowuje, w miarę możliwości, realne warunki hydrogeologiczne. Kluczowe znaczenie ma zgromadzenie danych dotyczących parametrów hydrogeologicznych skał budujących modelowany górotwór (współczynniki filtracji, miąższość, współczynniki odsączalności grawitacyjnej i sprężystej itp.) oraz informacji o rodzaju wzajemnych kontaktów pomiędzy poszczególnymi piętrami wodonośnymi. Budowa modelu numerycznego wymusza pewien stopień schematyzacji warunków hydrogeologicznych i założeń upraszczających, w związku ze skomplikowaną budową geologiczną utworów czwartorzędowych w rejonie Zakładów Chemicznych „Zachem” oraz niepełnego rozpoznania rejonu składowiska „Zielona”. W przypadku braku danych dotyczących pewnych elementów środowiska wodnego (np. wielkości infiltracji, ucieczek wody z rzek, rodzaju kontaktów hydraulicznych pomiędzy piętrami wodonośnymi czy granic zlewni podziemnej) przyjmuje się arbitralne założenia, które na drodze symulacji komputerowej mogą zostać zweryfikowane.

Model konceptualny jest sumą zgromadzonych danych hydrogeologicznych, przyjętych założeń upraszczających i testowanych hipotez. Jakość modelu zależy bezpośrednio od wiedzy i zrozumienia

warunków hydrogeologicznych rejonu badań przez wykonujących badania modelowe. Weryfikacja modelu konceptualnego odbywa się poprzez wykonanie obliczeń symulacyjnych i porównanie wyników z wartościami uzyskanymi na drodze pomiarów wykonanych dla rzeczywistego górotworu.

Podstawowe znaczenie dla konstrukcji numerycznego modelu warunków przepływu wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z zasięgiem chmury zanieczyszczeń, miały w szczególności profile wybranych otworów badawczych oraz wyniki prowadzonych w nich pomiarów położenia zwierciadła wód podziemnych.

Konceptualny model hydrogeologiczny omawianego obszaru został przygotowany na podstawie wybranych profili i kart otworów pozyskanych z bazy Banku Danych Hydro PIG-PIB oraz danych archiwalnych z opracowań naukowo – badawczych:

- Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne w rejonie ul. Zielonej na terenie Zakładów Chemicznych ZACHEM w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne Sp. z o.o. w Gdańsku. Gdańsk 2001,
- Dokumentacja hydrogeologiczna badań migracji skażeń w rejonie ZCh „Organika – Zachem” w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Geologiczne w Warszawie Zakład w Gdańsku. Gdańsk 1989.

Model hydrogeologiczny tworzony dla rejonu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” ma na celu określenie warunków przepływu wód podziemnych, a następnie odwzorowanie migracji różnego rodzaju zanieczyszczeń. W związku z powyższym, w trakcie konstrukcji modelu hydrogeologicznego omawianego obszaru główny nacisk położono na dokładne odwzorowanie piętra czwartorzędowego, zanieczyszczonego na skutek działalności Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Stworzony model numeryczny odwzorowuje wodonośne utwory czwartorzędowe oraz utwory neogenu. Kluczowe znaczenie warunkujące wzajemne oddziaływanie wspomnianych pięter wodonośnych ma rozdzielająca je warstwa plioceńskich iłów i mułków ilastych. Warstwa ta nie występuje w głębokiej pradolinie Toruńsko – Eberswaldzkiej, jak również na większym obszarze w dolinach rzek Brdy i Wisły, gdzie istnieje kontakt czwartorzędowego i neogeńskiego piętra wodonośnego.

Zwierciadło wód podziemnych w obrębie piętra czwartorzędowego ma charakter swobodny. Z kolei w przypadku piętra neogeńskiego charakter zwierciadła zależy od lokalnych warunków geologicznych. W strefach występowania słabo przepuszczalnych utworów plioceńskich występuje zwierciadło naporowe, zaś w strefach bezpośredniego kontaktu piasków miocenowych i czwartorzędowych – zwierciadło swobodne. Przepływ wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów „Zielona” pozostaje pod silnym drenującym wpływem rzek Wisły i Brdy. Wody podziemne przemieszczają się w kierunku ich koryt generalnie z południowego – zachodu na północny – wschód oraz wschód.

Badania modelowe warunków przepływu wód podziemnych wykonano przy pomocy programu Visual Modflow Flex, firmy Waterloo Hydrogeologic.

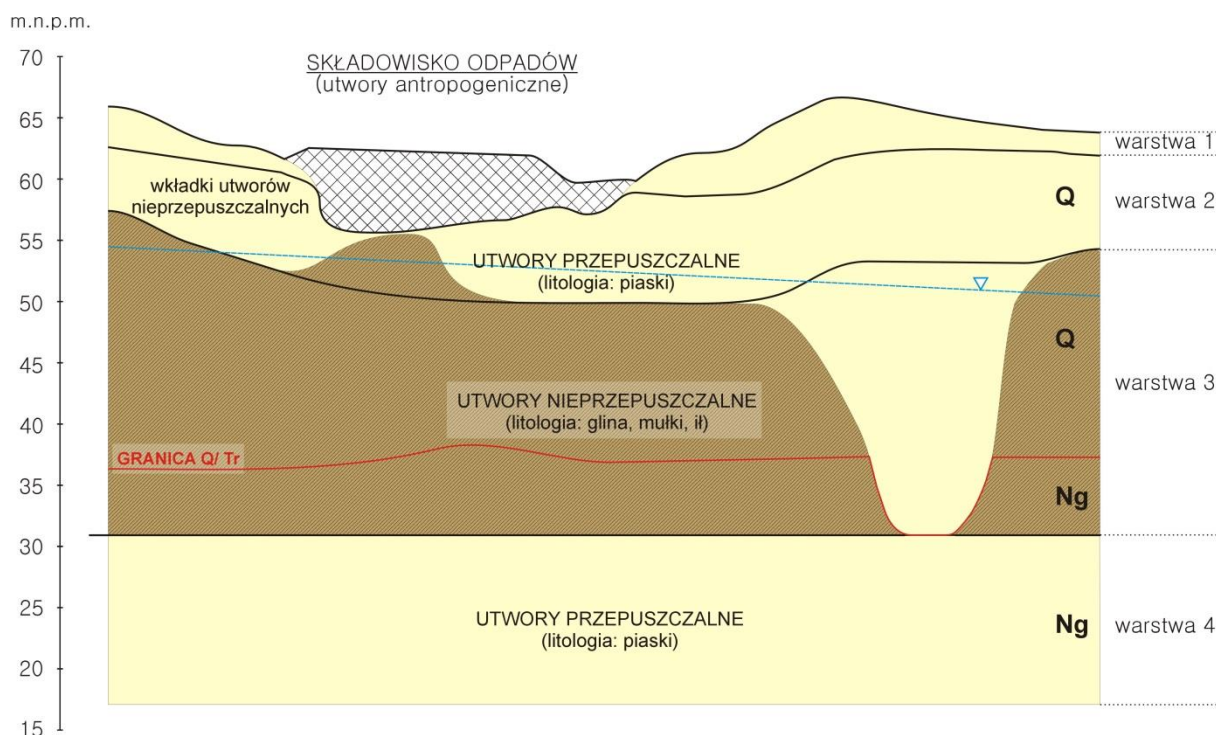
6.4.2. Struktura modelu numerycznego

Zasięg badań modelowych: Badaniami modelowymi objęty został obszar o sztucznie przyjętych granicach (w hydrogeologicznym znaczeniu). Obszar modelu od północy i południa ograniczają współrzędne geodezyjne odpowiednio Y_N : 439500 i Y_S : 441500 oraz od wschodu i zachodu X_W : 581000 i X_E : 579000 (w układzie 1992). Z racji lokalnego charakteru badań modelowych, obszar obejmuje teren o rozmiarach 2 km × 2 km, tj. 4 km². W jego granicach znajduje się nie tylko składowisko odpadów przemysłowych „Zielona”, ale również obszar będący w zasięgu chmury zanieczyszczeń ze składowiska.

Obszar badań modelowych został podzielony na kwadratowe bloki obliczeniowe o rozmiarze boku 50 m. Łącznie w granicach obszaru modelowego znalazło się po 1600 bloków na każdej warstwie (40 wierszy i 40 kolumn), przy czym wszystkie bloki są aktywne. Do konstrukcji modelu górotworu w podłożu Zakładów Chemicznych „Zachem” wykorzystano dane hydrogeologiczne ze wspomnianych wcześniej dokumentacji źródłowych. Ogółem do odwzorowania ukształtowania powierzchni terenu i budowy geologicznej wykorzystane zostały dane wysokościowe z 52 otworów badawczych oraz 95 punktów dodanych sztucznie, dodanych dla dokładniejszego odwzorowania poszczególnych powierzchni. W oparciu o przedstawione dane został przygotowany numeryczny model górotworu złożony z 4 warstw modelowych, odwzorowujących wydzielenia litologiczne, kluczowe dla opisu warunków hydrogeologicznych rejonu składowiska odpadów „Zielona” (Rys. 10).

Warstwy numerycznego modelu odwzorowują zatem:

- warstwa 1 – utwory antropogeniczne i utwory czwartorzędowe; warstwa ta odwzorowuje utwory antropogeniczne w postaci składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz dla zachowania ciągłości warstwy modelowej częściowo odwzorowuje wierzchnie, piaszczyste utwory czwartorzędowe,
- warstwa 2 – przepuszczalne utwory czwartorzędowe i wkładki utworów słabo przepuszczalnych; warstwa ta spełnia dwojaką rolę, przede wszystkim służy do wymodelowania kształtu wkładek słabo przepuszczalnych, a także odwzorowuje zawodnione piaski czwartorzędowe, będące piętrem wodonośnym, w którym odbywa się główna migracja zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”,
- warstwa 3 – utwory czwartorzędowe i utwory neogeńskie; warstwa ta odwzorowuje słabo przepuszczalne utwory czwartorzędowe wykształcone w postaci glin zwałowych oraz słabo przepuszczalne utwory neogeńskie wykształcone w postaci ilów i mułków. Ze względu na zbliżone parametry filtracyjne utworów, warstwę ujednolicono. Fragmentarycznie warstwa odwzorowuje kontakty hydrauliczne pomiędzy utworami czwartorzędownymi i neogeńskimi, występujące najczęściej w postaci doliny kopalnej wypełnionej materiałem piaszczystym,
- warstwa 4 – utwory neogeńskie; jednolita warstwa utworów piaszczystych, która w obszarze wysoczyzny jest odizolowana od piętra czwartorzędownego (za wyjątkiem kontaktu w głębokiej pradolinie), zaś w dolinach rzek Wisły i Brdy z uwagi na wyerodowanie słabo przepuszczalnych utworów plioceńskich ma bezpośredni kontakt z piaskami czwartorzędownymi. Od dołu warstwa ta jest izolowana przez warstwy oligoceńskie, wykształcone w przewadze w postaci utworów o bardzo słabej przepuszczalności, tj. ilu i mułu z przewarstwieniami piasków.



Rys. 10. Model konceptualny budowy geologicznej w rejonie składowiska „Zielona”

Warstwy modelu stworzono z uwzględnieniem ich zmiennej morfologii i miąższości, co z punktu widzenia dokładności badań modelowych jest bardziej właściwe od metodyki stosowania warstw płaskich o stałej miąższości.

Warunki brzegowe: Model hydrogeologiczny rejonu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” ma charakter lokalny. Granice zewnętrzne modelu numerycznego mają charakter sztuczny, a zostały przyjęte szerzej niż obszar składowiska. Granice południową (dolną) oraz zachodnią (lewą) przyjęto około 500 m od bryły składowiska. Granice oparto na warunku I rodzaju ($H=const$). Założenie to odnosi się do warstwy 1, 2 i 4 modelu.

Zasilanie z opadów atmosferycznych modelowano warunkami II rodzaju $Q=const$ (*Recharge* w programie Visual Modflow). Dla obszaru badań modelowych położonego w strefie porośniętej lasami założono intensywne zasilanie z infiltracji opadów atmosferycznych w wysokości 154 mm (30% rocznej sumy opadów dla Kujaw, równej około 530 ÷ 550 mm). Z kolei dla obszaru doliny rzeki Wisły założono infiltrację rzędu 128,25 mm (25%), natomiast najniższe wartości infiltracji opadów przypisano obszarom zabudowanym 25,65 mm (5%), z uwagi na szczelne pokrycie powierzchni terenu, przez co dominujące znaczenie ma spływ powierzchniowy.

Studnie bariery odwadniającej z uwagi na epizodyczny charakter eksploatacji, a w roku 2013 całkowite jej zaprzestanie, w granicach obszaru badań modelowych odwzorowano przy użyciu warunków II rodzaju $Q=const$ (*Pumping Well* w programie Visual Modflow), z uwzględnieniem poszczególnych miesięcy, w których studnie były czynne.

Parametry modelu numerycznego: Parametry modelu przyjęte w początkowym etapie jego konstrukcji zostały dotarowane do ostatecznych wartości na podstawie procedury kalibracyjnej modelu. Polegała ona na dopasowaniu, w miarę możliwości jak najbardziej dokładnym, kształtu zwierciadła wody do rzeczywistych danych pomiarowych. W związku z faktem, iż pomiary głębokości

zalegania zwierciadła wód podziemnych wykonane w czerwcu 2017 roku (Tab. 4) wykazały, że średnia arytmetyczna różnicy rzędnej zwierciadła wody w stosunku do pełnych pomiarów wykonanych dla całego ZCh „Zachem” w 2012 roku (Tab. 4) wynosi około 57 cm do kalibracji modeli warunków hydrogeologicznych i migracji zanieczyszczeń wykorzystano wszystkie dane z całego 5 letniego okresu badań.

W prowadzonych badaniach modelowych przyjęto założenie o konstrukcji modelu o jak najmniejszej niejednorodności, starając się nie wprowadzać stref o nieuzasadnionych różnicach w zakresie parametrów hydrogeologicznych warstwy wodonośnej, poza obszarami rozpoznanymi.

Tab. 4. Otwory piezometryczne poddane badaniom monitoringowym w latach 2012-2015 oraz w czerwcu 2017

Piezometr	Rzędna powierzchni terenu [m npm]	Rzędna zwierciadła wód podziemnych (2012) [m npm]	Rzędna zwierciadła wód podziemnych (2017) [m npm]	Zmiana rzędnej zwierciadła wody [m]
SKŁADOWISKO ODPADÓW „ZIELONA”				
P13	58,67	55,12	51,69	-3,43
P17	59,67	56,15	53,76	-2,39
P18	61,00	55,05	54,96	-0,09
P19	62,00	55,29	53,96	-1,33
P20	57,50	55,05	53,10	-1,95
P21	57,50	55,93	53,07	-2,86
PZ1	65,00	55,60	55,91	0,31
PZ2	62,40	57,65	56,85	-0,8
PZ3	60,80	56,87	55,05	-1,82
PZ4	63,24	56,58	56,22	-0,36
PZ5	60,40	55,81	55,39	-0,42
PZ6	65,00	58,41	58,10	-0,31
PZ7	60,80	57,98	57,25	-0,73
PZ9	60,80	57,33	53,79	-3,54
PZ12	60,40	56,59	-	-
PZ13	60,40	53,99	53,45	-0,54
UJĘCIE „BARIEROWE”				
28/900	37,57	36,89	-	-
29/900	40,10	37,51	37,55	0,04
BP1	41,19	38,39	38,21	-0,18
BP2	43,38	39,43	39,41	-0,02
BP3	44,68	37,92	37,87	-0,05
III/3	47,50	41,69	-	-
INNE				
P7	66,39	51,73	-	-
P14	53,26	48,89	-	-
P15	48,48	43,40	-	-

Ostateczne parametry użyte w modelu wykonanym w programie Visual Modflow przedstawiono w tabeli (Tab. 5). Wartości współczynników filtracji są zbliżone do podawanych dla rejonu badań w opracowaniach źródłowych.

Tab. 5. Parametry wykorzystane w modelu hydrogeologicznym w rejonie składowiska

Litologia warstwy	Współczynnik filtracji [m/s]	Współczynnik odsączalności [-]	Współczynnik porowatości efektywnej [-]	Współczynnik porowatości całkowitej [-]
WARSTWA 1				
utwory antropogeniczne	1×10^{-5}	0,05	0,12	0,15
piaski (Q)	2×10^{-4}	0,25	0,30	0,32
WARSTWA 2				
wkładki słabo przepuszczalne	1×10^{-9}	0,01	0,05	0,40
piaski (Q)	2×10^{-4}	0,25	0,30	0,32
WARSTWA 3				
gliny zwałowe (Q), iły i mułki (Ng)	1×10^{-9}	0,01	0,05	0,45
WARSTWA 4				
piaski (Ng)	2×10^{-4}	0,25	0,30	0,32

6.4.3. Wyniki badań modelowych

Głównym celem wykonanych badań modelowych było stworzenie wiarygodnego, lokalnego modelu hydrogeologicznego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” w Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe z istniejących otworów piezometrycznych. W kolejnym etapie badań przeprowadzone zostały symulacje prognostyczne charakteryzujące proces migracji zanieczyszczeń pochodzących z ogniska zanieczyszczeń, będącego w strumieniu wód podziemnych.

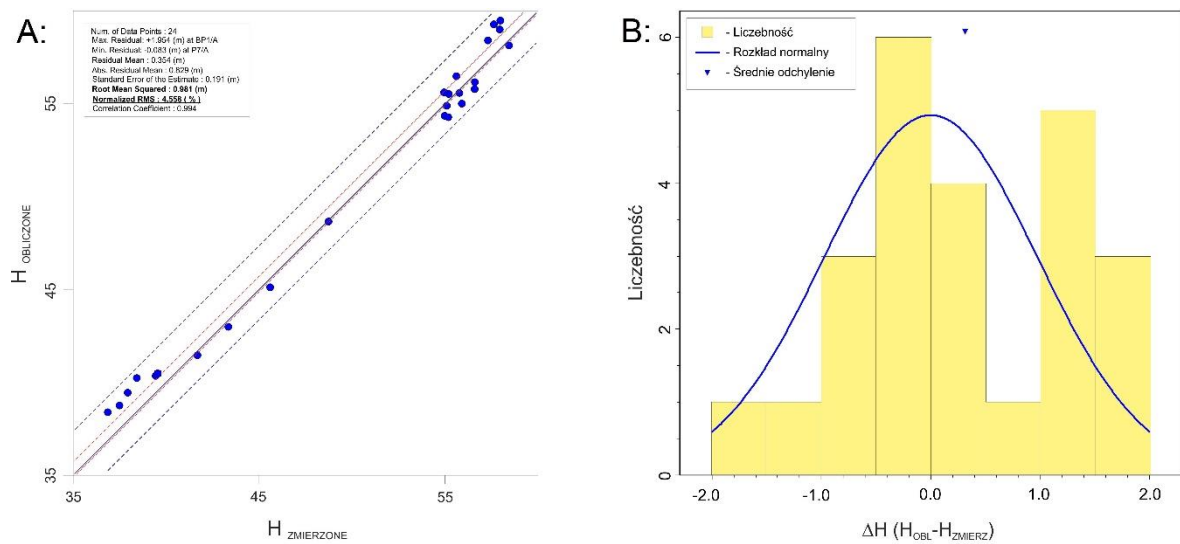
Model „wyjściowy”: W początkowym etapie badań modelowych przygotowany został numeryczny model hydrogeologiczny rejonu składowiska odpadów „Zielona”, odtwarzający aktualne warunki przepływu wód podziemnych w warstwie czwartorzędowej i w połączonych warstwach wodonośnych czwartorzędowej i neogeńskiej. Mapa hydroizohips czwartorzędowej warstwy wodonośnej uzyskana na podstawie badań modelowych została przedstawiona na rysunku (Rys. 11).



Rys. 11. Wynikowa mapa czwartorzędowego piętra wodonośnego w rejonie składowiska odpadów „Zielona”

Model hydrogeologiczny analizowanego obszaru bardzo dobrze odwzorowuje realny układ pola hydrodynamicznego uzyskany na podstawie pomiarów terenowych. Dla zdecydowanej większości punktów pomiarowych poziomu zwierciadła wód podziemnych różnice pomiędzy rzeczywistymi i obliczonymi rzędnymi zawierają się w granicach $\pm 1-2$ m w stosunku do pomiaru z roku 2017. Największe różnice występują w otworach położonych głównie w strefie bardzo silnego spadku zwierciadła wody na granicy wysoczyzny i doliny Wisły (w rejonie bariery odwadniającej – piezometr BP1). Dokładne odwzorowanie kształtu zwierciadła wody w tej strefie jest bardzo trudne, gdyż niewielkie przesunięcie otworu skutkuje znaczną różnicą w położeniu zwierciadła wody.

Wysoki stopień dopasowania modelu do rzeczywistych warunków potwierdzają niskie wartości dwóch kluczowych miar statystycznych: średniego błędu bezwzględnego RMS (*Root Mean Squared*) wynoszącego tylko około 0,98 m oraz jego znormalizowanej względnej wartości (*Normalized RMS*) wynoszącej tylko około 4,6% (Rys. 12a). Należy jednocześnie zwrócić uwagę, że różnice między wartościami zmierzonymi a obliczeniowymi (tj. błąd modelu) mają rozkład normalny (Rys. 12b).



Rys. 12. (a) Wykres i statystyki modelu hydrogeologicznego w rejonie składowiska „Zielona” oraz
 (b) histogram rozkładu odchyleń pomiędzy wartościami obliczonymi na modelu a zmierzonymi w piezometrach
 w rejonie składowiska „Zielona”

7. WARUNKI GEOLOGICZNO – INŻYNIERSKIE I GEOTECHNICZNE

Charakterystyka geologiczno-inżynierska terenu w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” jest uzależniona od przestrzennego rozmieszczenia osadów czwartorzędowych i neogeńskich, ich właściwości fizycznych i warunków występowania, morfologii terenu oraz warunków hydrogeologicznych. Omawiany teren obejmuje nie tylko obszar dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy zlokalizowanych na wysoczyźnie, ale również jej skłon oraz morfologiczne obniżenie aż do koryta rzeki Wisły. Analiza geotechniczna tego wbrew pozorom znacznie zróżnicowanego obszaru jest stosunkowo skomplikowana, ale jednocześnie ma decydujące znaczenie podczas doboru technik remediacyjnych, mających wpływ na warunki mechaniczne i wytrzymałościowe gruntu. W bezpośrednim rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” i generalnie na obszarze wysoczyzny wyróżnić można korzystne warunki geologiczno-inżynierskie dla budownictwa. Oznacza to, że w strefie wyższych teras rzecznych oraz na terenach sandrowych obserwuje się występowanie: gruntów spoistych, zwartych, półzwartych i twar doplastycznych, gruntów sypkich średnio zagęszczonych i zagęszczonych, na których nie występują zjawiska geodynamiczne, a głębokość zalegania zwierciadła wód podziemnych wynosi ponad 2,0 m. Pogorszone warunki geologiczno-inżynierskie mogą występować tylko w strefach występowania wychodni utworów ilastych, gdzie wskutek obecności wody np. po okresie intensywnych opadów, grunty spoiste mogą ulegać uplastycznieniu.

Wraz z kierunkiem rozprzestrzeniania się chmury zanieczyszczonych wód podziemnych do Wisły zmieniają się także warunki geologiczno-inżynierskie. Obszar ten jest predysponowany dla potencjalnego występowania osuwisk oraz ruchów masowych. Aktualnie, na skarpie wysoczyzny w kierunku doliny Wisły można zaobserwować intensywne ruchy masowe w postaci aktywnych, rozległych osuwisk. U podnóża krawędzi występują aktywne wypływy wód podziemnych w postaci: źródeł, sączeń, wysięków i młak. W związku jednak z intensywnym obniżeniem poziomu zwierciadła wód podziemnych od 2010 roku (susza hydrologiczna), przejawy wodne straciły na intensywności i w okresach bezopadowych mogą być trudne do zaobserwowania.

Analizując teren dalej w kierunku wschodnim i północno-wschodnim warunki geologiczno-inżynierskie zmieniają swój charakter na utrudniający budownictwo. Występuje on głównie na terasie zalewowej Wisły, ale również w zagłębieniach wytopiskowych oraz na obszarach wydmych. Strefy te charakteryzują się płytkim zaleganiem czwartorzędowego zwierciadła wód podziemnych (do maksymalnie 2,0 m p.p.t.). Występują tu powszechnie obszary gruntów słabonośnych (typu mać, mułowców i iłowców), a teren w obrębie wałów przeciwpowodziowych jest zalewany podczas wysokich stanów wód powierzchniowych. Utrudnione warunki budowlane występują również w strefach wydmych zbudowanych z gruntów sypkich luźnych, gdyż spadki zboczy większych wydmy na tym terenie przekraczają około 12%.

Na oddzielną uwagę, podczas interpretacji warunków geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych w związku z posadowieniem wszelkich konstrukcji wykonywanych w celu prowadzenia remediacji, zasługują płyty plioceńskich iłów poznańskich, które występują fragmentarycznie na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Były one przyczyną wielu szkód budowlanych w Bydgoszczy polegających na pękaniu starszych, płytko posadowionych budynków (Kozłowska, 1991).

8. IDENTYFIKACJA SUBSTANCJI ZANIECZYSZCZAJĄCYCH

Analiza stopnia zanieczyszczenia czwartorzędowych wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” została odniesiona do wartości tła hydrogeochemicznego, wyznaczonego dla całego obszaru Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy.

Tło hydrogeochemiczne odpowiadające składowi chemicznemu niezanieczyszczonych wód podziemnych występujących w warunkach naturalnych zostało wyznaczone na podstawie opróbowania wód w strefie ujęcia „S” oraz w punktach stanowiących jego sieć monitoringową. Niezanieczyszczone wody podziemne czwartorzędowego piętra wodonośnego charakteryzują się zatem typem hydrogeochemicznym Ca-HCO₃, o mineralizacji wody w granicach 242-406 mg/L, przy średniej arytmetycznej na poziomie 353 mg/L. Stężenia dominujących jonów wynoszą około 42-79 mg/L dla wapnia oraz w granicach 165-254 mg/L w przypadku wodorowęglanów (Pietrucin, 2015).

Analizy chemiczne składników nieorganicznych, odniesione do tła hydrogeochemicznego, wskazują, iż cały obszar dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy należy traktować jako zanieczyszczony. Obserwuje się tu pełne zróżnicowanie wód podziemnych pod względem typu hydrogeochemicznego. Analogiczna różnorodność charakteryzuje wody w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”.

W rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” badane próbki wód wykazują występowanie silnie przeobrażonych typów hydrogeochemicznych: czterojonowych (Na-Cl-SO₄-HCO₃, Na-Ca-SO₄-HCO₃, Ca-Na-SO₄-HCO₃, Na-Ca-Cl-SO₄, Na-Ca-Cl-HCO₃) i podrzędnie dwujonowych (Na-SO₄) oraz trójjonowych (Na-Ca-Cl, Na-SO₄-Cl) a także pięciojonowych (Na-Ca-SO₄-HCO₃-Cl, Ca-Fe-Na-HCO₃-Cl).

W rejonie bariery odwadniającej, próbki pobrane z sieci monitoringowej wykazały dominację wód trójjonowych (Na-SO₄-HCO₃, Ca-HCO₃-Cl, Ca-Cl-HCO₃) oraz czterojonowych (Na-SO₄-HCO₃-Cl, Ca-Na-Cl-HCO₃). Szczególnie zanieczyszczone wody, analogicznie jak w rejonie składowiska mają typ pięciojonowy (Ca-Na-HCO₃-Cl-NO₃, Ca-Na-HCO₃-NO₃-SO₄).

Wody podziemne w rejonie ujęcia barierowego, będące w zasięgu oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, mają charakter zasadowy (odczyn pH 8-10) oraz redukcyjny, i charakteryzują się przewodnością elektrolityczną właściwą na poziomie około 2,2-2,9 mS/cm. Wody te charakteryzują się stosunkowo wysokimi stężeniami siarczanów (SO₄²⁻ ok. 500-1200 mg/L), chlorków (Cl⁻ ok. 150-175 mg/L), wodorowęglanów (HCO₃⁻ ok. 500-560 mg/L) oraz sodu (Na⁺ ok. 500-700 mg/L).

8.1. Substancje nieorganiczne

Z punktu widzenia zagrożenia środowiska gruntowo – wodnego, niebezpieczne są zarówno składowiska odpadów przemysłowych aktualnie eksploatowane, jak również historyczne, możliwe do identyfikacji na podstawie studiów literaturowych materiałów archiwalnych. Istotne w tym aspekcie jest uwzględnienie specyfiki Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, zarówno pod względem asortymentu produkcji, jak również stosowanych metod technologicznych. Analizując

skład chemiczny profilu produkcyjnego Zakładów, można dostrzec silną więź pomiędzy rodzajem produkcji a zanieczyszczeniami przedostającymi się do środowiska gruntowo – wodnego, w tym w szczególności do wód podziemnych czwartorzędowego piętra wodonośnego.

W świetle prowadzonych badań hydrogeochemicznych oraz aktualnego stanu składowiska „Zielona” głównymi substancjami nieorganicznymi zanieczyszczającymi środowisko gruntowo-wodne są chlorki (Cl^-) oraz sód (Na^+). W odniesieniu do składowiska odpadów „Zielona”, najwyższe stężenia chlorków oznaczono w bezpośrednim rejonie składowiska, w piezometrach Pz5, Pz12 i Pz13, gdzie średnie stężenie wynosi około 10 g/L. Migrującym chlorkom w środowisku gruntowo – wodnym towarzyszy sód (Na^+). Najwyższe stężenie sodu wynosi w rejonie składowiska 4,4 g/L (P17), natomiast w studniach i sieci monitoringowej bariery odwadniającej około 600 mg/L (28/900, 29/900, III/3 i BP3). Bardzo wysokie stężenia oznaczono także dla siarczanów (SO_4^{2-}) sięgające niemal 8 g/L w piezometrze P21.

Badania wód podziemnych w piezometrach rejonu składowiska „Zielona” wykazały dotychczas wysokie stężenia takich pierwiastków jak bor (B) przy maksymalnym oznaczonym stężeniu 3,5 mg/L (piezometr P21), brom (Br) na poziomie 10,6 mg/L (P21), a także żelazo (Fe), stront (Sr), tytan (Ti) i cynk (Zn) w maksymalnych stężeniach odpowiednio 800 (Pz12), 3,7 (Pz5), 1,3 (P18) oraz 4,2 mg/L (P13). Z uwagi na długą i zróżnicowaną produkcję prowadzoną w obszarze dawnych ZCh „Zachem” należy jednak szczegółowo analizować wszystkie badania fizyko-chemiczne wód podziemnych z uwagi na wystąpienie innych substancji nieorganicznych zanieczyszczających środowisko, w tym metali ciężkich.

8.2. Substancje organiczne

Zanieczyszczenie wód podziemnych substancjami organicznymi jest prawie zawsze związane z działalnością człowieka, gdyż w naturalnych warunkach tego typu substancje nie mogą występować. Na obszarach silnej antropopresji i intensywnej działalności przemysłowej wody podziemne są tym bardziej narażone na zanieczyszczenie. Do takiego zdarzenia doszło również w przypadku dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy.

Podczas szczegółowego studium historii eksploatacji i depozycji odpadów w rejonie składowiska „Zielona” wytypowano 6 podstawowych grup substancji potencjalnie zanieczyszczających. Czynniki decydującymi o przynależności do grupy były: produkty pierwotne wraz z pochodnymi i odpadami produkcyjnymi oraz zbliżona budowa wewnętrzna związków chemicznych, warunkująca zachowanie substancji w środowisku wodnym.

W środowisku gruntowo – wodnym rejonu składowiska wyróżniono grupy zanieczyszczeń:

- fenol wraz z pochodnymi tego związku oraz produktami jego rozpadu w środowisku wodnym;
- chlorofenole - związane z produkcją związków grzybobójczych oraz w mniejszej skali środków chwasto- i owadobójczych. Dopuszcza się także możliwość depozycji tych substancji na składowisku w wyniku składowania odpadów innych podmiotów niż dawne Zakłady Chemiczne „Zachem” w Bydgoszczy;

- pak pofenolowy - (tj. odpad bezpostaciowy) związany bezpośrednio z produkcją fenolu oraz kleju Rezokol (żywicy fenolowo – formaldehydowej);
- siarczyn sodu - będący odpadem z produkcji fenolu, a w związku z tym silnie zanieczyszczony tą substancją organiczną;
- glikole - których pochodzenie związane jest z odpadami surowców poprodukcyjnych lub z wymienników ciepła;
- barwniki i półprodukty barwnikarskie - związane bezpośrednio z produkcją pigmentów i barwników na terenie Zakładów. Do grupy tej zalicza się przede wszystkim takie substancje jak anilina i chloroanilina.

Badania hydrogeochemiczne realizowane przez AGH w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wykazały, że gleby i grunty oraz wody podziemne prócz substancji wymienionych na podstawie wykonanego studium literaturowego zanieczyszczone są substancjami o charakterze toksycznym, mutagennym i często kancerogennym, w tym:

- fenolem;
- aniliną, toluidyną i chloroaniliną;
- oktylofenolami i estrami oktylofenolooksyetylenowymi;
- hydroksybifenylami;
- difenylosulfonem.

Na szczególną uwagę zasługują także związki typu AOX (substancje hal organiczne), jak również TCE i PCE należące do grupy chlorowanych etenów, odpowiednio tri- i tetra.

8.3. Szczegółowa charakterystyka wybranych potencjalnych substancji zanieczyszczających

8.3.1. Fenol

Hydroksybenzen C_6H_5OH (fenol) to najprostszy związek z grupy fenoli, związków organicznych zawierających grupy hydroksylowe związane bezpośrednio z atomami węgla w pierścieniu aromatycznym. Substancja występuje w postaci białej lub bezbarwnej substancji krystalicznej, bądź blado różowego płynu, które brązowieją pod wpływem działania powietrza atmosferycznego. Charakteryzuje się obrzydliwie słodkim, smolistym zapachem (Montgomery, 2000; ATSDR, 2011). W powietrzu zapach jest wyczuwalny przy stężeniu 9,5 do 16 ppb (Keith, Walters, 1992; Young i in., 1996), natomiast w wodzie smak wyczuwalny jest poniżej stężenia 2 ppb (Young i in., 1996).

Degradacja fenolu w gruncie jest silnie zróżnicowana ze względu na panujące warunki utleniająco – redukcyjne. W lekko zasadowej glinie piaszczystej (3,25% materii organicznej) czas połowicznego rozpadu wynosi 4,1 dnia, natomiast dla kwaśnych glin (< 1% materii organicznej) wartość parametru wynosi 23 dni (Loehr, Matthews, 1992).

Migracja zanieczyszczeń w wodach podziemnych, będąca przedmiotem badań, odbywa się w warunkach zbliżonych do opisanych przez Nielsena i in. (1996). Przebadano bowiem degradację fenolu w warunkach swobodnych, płytkiego krążenia wód podziemnych w piaskach o genezie fluwioglacjalnej w rejonie Jutland (Dania). Porównywalne warunki hydrogeologiczne pozwalają

przyjąć hipotezę o zbliżonych procesach hydrogeochemicznych zachodzących w czwartorzędowej warstwie wodonośnej w Bydgoszczy.

Część badań *in situ*, stanowił cylinder zainstalowany około 5 metrów poniżej poziomu wody podziemnej w badanym otworze. Cylinder ten był ekranowany w stropie i otwarty w spągu, natomiast dla zapewnienia warunków utleniających 5 litrów wody natleniono powietrzem atmosferycznym. Stężenia fenolu badano cotygodniowo przez okres 3 miesięcy, co pozwoliło określić eksperymentalną stałą prędkość biodegradacji pierwszego rzędu oraz czas połowicznego rozpadu $t_{1/2}$ wynoszące odpowiednio 0,5/dobę oraz 33,4 godziny. Vainshnav i Babeu (1987) podają natomiast wartości odpowiednio 0,035/dobę oraz 20 dni w wodach podziemnych. Dopuszcza się jednak długotrwałe utrzymywanie się fenolu w środowisku gruntowo – wodnym, w przypadku, gdy stężenia osiągają wysokie wartości (ATSDR, 2011). Podczas procesu migracji stała podziału K_{ow} dla fenolu wynosi $1,31 \div 1,57$, natomiast stała podziału K_{oc} $1,21 \div 3,46$ (Montgomery, 2000).

W przypadku składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy ilość zdeponowanego fenolu jest znacząca (pierwotnie kilkadziesiąt ton). Oznacza to, iż mimo stosunkowo krótkiego czasu połowicznego rozpadu fenol będzie obecny w wodach podziemnych w kolejnych latach. Aktualnie i nieprzerwanie zachodzi intensywny proces wymywania odpadu ze składowiska. Wysokie stężenia fenolu w wodach podziemnych będą odnotowywane, dopóki składowisko nie zostanie poprawnie zrekultywowane.

W warunkach redukcyjnych w warstwie wodonośnej zachodzi degradacja fenoli zanieczyszczających wody podziemne. Produktami procesu są metan CH_4 oraz dwutlenek węgla CO_2 . Porównywalny rezultat degradacji osiągnięto z wykorzystaniem beztlenowej komory fermentacyjnej (Godsy i in. 1983). Doświadczenie ozonowania fenolu w wodzie informuje o występowaniu różnorodnych form utlenionych. Zidentyfikowane produkty, w kolejności degradacji, to: o-dihydroksybenzen $C_6H_6O_2$ (pirokatechina), 1,4-dihydroksybenzen $C_6H_6O_2$ (hydrochinon), 1,2-benzochinon $C_6H_4O_2$ (o-benzochinon), kwas cis,cis-2,4-heksadienodiowy $C_6H_6O_4$ (kwas śluzowy), kwas cis-butenodiowy $C_4H_4O_4$ (kwas maleinowy), kwas trans-butenodiowy $C_4H_4O_4$ (kwas fumarowy), kwas etanodiowy $C_2H_2O_4$ (kwas szczawiowy) (Eisenhauer, 1968).

Dalsze utlenianie zanieczyszczeń do dwutlenku węgla CO_2 poprzedziło zidentyfikowanie substancji: kwas oksoetanowy $C_2H_2O_3$ (kwas glioksalowy), kwas metanowy CH_2O_2 (kwas mrówkowy), kwas etanowy $C_2H_4O_2$ (kwas octowy) (Kuo i in. 1977).

Poddanie wodnego roztworu fenolu działaniu promieni UV skutkuje występowaniem w środowisku głównie substancji: etanodiol $C_2H_2O_2$ (glioksal), kwasów oksoetanowego, etanodiowego i metanowego. Produktami podrzędnymi są o-dihydroksybenzen, 1,4-dihydroksybenzen, kwas cis,cis-2,4-heksadienodiowy, kwas trans-butenodiowy oraz kwas etanodiowy (Takahashi, 1990; Montgomery, 2000).

Fenol zdeponowany na składowisku „Zielona” w Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy jest związany bezpośrednio z produkcją fenolu oraz produktów pośrednich jak kleje fenolowo – formaldehydowe. Odpad ten stosunkowo łatwo dostępny na składowisku. Zrekrytalizowany odpad, częściowo odsłonięty stanowi realne zagrożenie dla zdrowia. Toksyczność fenolu jest duża.

Przypuszcza się, że powoduje wady genetyczne i wywołuje mutacje genowe. Dawka śmiertelna $LD_{50(szczur)}$ wynosi 340 mg/kg (oral=przyjęta doustnie), 660 mg/kg (led=przyjęta przez skórę), >900 mg/m³ (8h, inh=przyjęta przez oddychanie) (INEOS Phenol, 2014).

8.3.2. Chlorofenole

Chlorofenole w środowisku gruntowo – wodnym występują w pięciu podstawowych typach: monochlorofenole, chlorofenole, trichlorofenole, tetrachlorofenole oraz tetrachlorofenole. Łącznie wyróżnia się 19 związków, przy czym w aspekcie ochrony środowiska istotne są przede wszystkim: 1-chlorofenol C_6H_5ClO (chlorofenol), 2-chlorofenol C_6H_5ClO (o-chlorofenol), 4-chlorofenol ClC_6H_4OH (p-chlorofenol), 2,4-dichlorofenol $C_6H_4Cl_2O$ (DCF), 2,4,5-trichlorofenol $Cl_3C_6H_2OH$ (TCF), 2,4,6--trichlorofenol $C_6H_2Cl_3OH/C_6H_3Cl_3O$ (trichlorofenol, TCF), 2,3,4,5-tetrachlorofenol $C_6H_2Cl_4O$ (tetrachlorofenol, TeCP), 2,3,4,6-tetrachlorofenol $C_6H_2Cl_4O$ (tetrachlorofenol, TeCP) oraz 2,3,5,6-tetrachlorofenol $C_6H_2Cl_4O$ (tetrachlorofenol, TeCP), a także 2,3,4,5,6-pentachlorofenol C_6HCl_5O (pentachlorofenol, PCP). Pentachlorofenol wykazuje spośród grupy cholofenoli najwyższą toksyczność (Bogacka i in., 1996; ATSDR, 1999).

1-chloro-(2,3,4)-hydroksybenzen C_6H_5ClO (chlorofenol) to najprostszy, dowolny związek chloroorganiczny fenolu, który zawiera jeden lub więcej kowalencyjnie związany atom chloru. Substancja występuje w formie blado bursztynowego płynu o lekko fenolowym zapachu. W powietrzu zapach jest wyczuwalny przy stężeniu 0,088 do 20 ppb (Keith, Walters, 1992; Young i in., 1996), natomiast w wodzie smak wyczuwalny jest przy stężeniu 0,14 ppb (Young i in., 1996). Smak chlorofenoli określa się mianem apetycznego. Stanowią zagrożenie dla zdrowia i życia organizmów (w tym człowieka) w związku z ich toksycznością. Działają rakotwórczo i mutanogennie, nawet przy małych stężeniach. Zaleca się zatem ich monitorowanie w środowisku gruntowo – wodnym (Dmitruk i in., 2006)

Monochlorofenole poddane działaniu promieniowania słonecznego UV przyspieszają powstawanie w środowisku o-dihydroksybenzenu oraz innych hydroksybenzenów (Hwang i in., 1986). Chlorofenol w znacznym stopniu przechodzi w dwutlenek węgla pod wpływem działania dwutlenku tytanu będącego w zawiesinie roztworu wodnego poddanego promieniowaniu UV (Matthews, 1986). Podobne doświadczenie naświetlenia roztworu zawierającego chlorofenol i dwutlenek tytanu wykazało obecność 2-chloro-1,4-dihydroksybenzenu $C_6H_5ClO_2$ (chlorohydrochinon) oraz śladowe ilości o-dihydroksybenzenu. Hydroksylacja tych dwóch substancji tworzy pośrednie 1,2,4-trihydroksybenzeny $C_6H_6O_3$ (hydroksyhydrochinony), które szybko degradują w niezidentyfikowane kwasy i związki karbonylowe (D'Oliveira i in., 1990).

Poddanie roztworu wodnego promieniom UV oraz pH w przedziale 8 do 13 implikuje różnorodne produkty. Fotoliza w warunkach pH zbliżonym do stałej dysocjacji (formy niezdisocjowane) wytwarza o-dihydroksybenzen. Przy wyższych wartościach pH, chlorofenol niemalże całkowicie ulega dysocjacji, a fotoliza wytwarza kwas 1,3-cyklopentadien-1-karboksylowy $C_6H_6O_2$ (kwas cyklopentadienowy) (Boule i in., 1982). Przy obecności wodoru w procesie utleniania produkowany jest o-dihydroksybenzen oraz 2-chloro-1,4-dihydroksybenzen (Moza i in., 1988). Przy braku dostępności promieniowania UV, tlenek azotu (10⁻³% objętości) reaguje z chlorofenolem formując

4-nitro-2-chlorofenol $C_6H_4ClNO_3$ i 6-nitro-2-chlorofenol $C_6H_4ClNO_3$ odpowiednio na poziomie 36 i 30% (Kanno, Nojima, 1979).

Podczas laboratoryjnych badań eksperymentalnych w warunkach utlenionych czas połowicznego rozpadu $t_{1/2}$ chlorofenolu w gruncie oznaczono na poziomie 7,2 dnia dla kwaśnej gliny (<1,0% materii organicznej) oraz 1,7 dnia w lekko zasadowej glinie piaszczystej (3,25% materii organicznej) (Loehr, Matthews, 1992). Parametry sorpcyjne wynoszą średnio K_{ow} $2,15 \div 2,29$ oraz K_{oc} $1,71 \div 3,69$ (Montgomery, 2000).

W przypadku omawianego składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” stężenia chlorofenoli oznaczane w wodach związane są bezpośrednio z ilością związku zdeponowanego. Ich obecność powiązana jest z produkcją związków grzybobójczych oraz środków chwasto- i owadobójczych. Podobnie jak w przypadku fenolu, mimo relatywnie krótkiego czasu połowicznego rozpadu, ciągłe wymywanie zanieczyszczeń implikuje proces infiltracji chlorofenoli do wód podziemnych. Ponadto chlorofenole trudno ulegają rozpadowi mikrobiologicznemu w warunkach naturalnych, co sprawia, że w środowisku są wykrywane po długim czasie (Sorensen, 1978). Związki te zatem będą nadal obecne w badanych wodach, do czasu zakończenia poprawnej, rzetelnej remediacji.

Toksyczność chlorofenoli jest silnie zależna od lipofilności i pH środowiska. Substancje te zaburzają przemiany biochemiczne w organizmie. Dawka śmiertelna $LD_{50(mysz)}$ wynosi 345 mg/kg (oral), natomiast $LD_{50(szczur)}$ wynosi 670 mg/kg (oral) (Sorenson, 1985).

8.3.3. Pak pofenolowy

Pak pofenolowy (smoły fenolowe) powstaje jako produkt reszkowy podczas trójetapowej metody otrzymywania fenolu i acetonu z benzenu i propylenu metodą kumenową. Uzyskiwany jest jako frakcja reszkowa w procesie destylacji fenolu (Ligorati, Sartorio, 1980). W wyniku kwasowej hydrolizy α,α -dimetylobenzylu-wodoronadtlenku $C_9H_{12}O_2$ (wodoronadtlenku kumenu) odzyskuje się pożądane produkty: fenol, 1-metyloetenylu-benzen C_9H_{10} (α -metylostyren), 2-fenylopropan C_9H_{12} (kumen) i propanon C_3H_6O (aceton).

Podczas produkcji powstaje średnio 120 – 150 kg produktu ubocznego w postaci smół fenolowych na 1 tonę fenolu. Oprócz produktów rozkładu i zwęglania zawierają one 2-fenylopropan-2-ol $C_9H_{12}O$ (hydroksykumen), α -metylostyren i jego polimery, 1-fenyloetanon C_8H_8O (acetofenon), fenol, 2-fenyloizopropylofenol $C_{15}H_{16}O$ (kumylofenol) (Lewandowski, Milchert, 2002). Dopuszcza się zatem przenikanie tych związków do środowiska gruntowo – wodnego na obszarze Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, w związku z deponowaniem odpadów poprodukcyjnych na składowisku odpadów przemysłowych „Zielona”.

Występowanie paku pofenolowego na składowisku „Zielona” związane jest również z odpadami z produkcji fenolu oraz produkcją kleju fenolowego Rezokol. Klej ten, żywica fenolowo – formaldehydowa, jest syntetycznym polimerem zawierającym pierścienie aromatyczne połączone wiązaniami metylenowymi lub dimetylenoeterowymi. Powstają w reakcji polikondensacji fenoli z formaldehydem w środowisku zasadowym.

Żywice charakteryzują się żółtą do brązowej barwy przy silnym nasyceniu koloru. Jasne żywice nabierają barwy podczas procesu produkcyjnego lub przechowywania. Dostępne są w przemyśle w formie stałej lub ciekłej (Avitabile, 2009).

Związki chemiczne, będące produktem ubocznym produkcji fenolu, wchodzące w skład paku pofenolowego są toksyczne. Mają degradujący wpływ na środowisko wodne.

8.3.4. Siarczyn sodu

Siarczan IV sodu Na_2SO_3 (trioksysiarczan IV sodu) to nieorganiczny związek chemiczny, będący solą kwasu siarkowego IV. Substancja ta występuje w postaci krystalicznej o barwie białej. Poddana działaniu powietrza atmosferycznego powoli utlenia się do siarczanu sodu Na_2SO_4 , przy czym hydrat tej soli $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ utlenia się trudniej (Gałęcki, 1964). Substancja jest rozpuszczalna w wodzie.

Nasycony wodny roztwór siarczynu sodu ma wartość około 9 pH. Roztwór poddany działaniu powietrza atmosferycznego powoli utlenia się do siarczanu sodu Na_2SO_4 , natomiast pozostawiając roztwór do krystalizacji w temperaturze pokojowej lub niższej tworzy się heptahydrat. W wilgotnym, ciepłym powietrzu hydrat krystalizuje w formie wykwitów lub utlenia się do siarczanu. Bezwodna forma substancji jest mniej podatna na utlenianie (Gałęcki, 1964; Windholz, 1976).

Siarczyn sodowy przyjmuje formę białego ciała stałego, które jest dobrze rozpuszczalne w wodzie. Posiada bardzo niską toksyczność, a w warunkach aerobowych szybko utlenia się do siarczanu VI sodu Na_2SO_4 .

Siarczyn sodowy na składowisku „Zielona” w Zakładach Chemicznych związany jest z przemysłową produkcją fenolu, podczas której powstawał jako produkt uboczny. Należy zwrócić uwagę, iż omawiany związek nieorganiczny jest zanieczyszczony fenolem. Ponadto w związku z dużą rozpuszczalnością siarczynu sodu (932 g/L w 20°C) ługowanie warstwy odpadu, zdeponowanego na składowisku „Zielona”, przez wody atmosferyczne zachodzi z bardzo dużą intensywnością.

8.3.5. Glikole

1,2-diole $\text{R}(\text{OH})_2$ (glikole, diole wicynalne) to chemiczne związki organiczne, alkohole zawierające grupy hydroksylowe przy sąsiadujących atomach węgla. Reaktywność glikoli zbliżona jest to innych alkoholi. W środowisku gruntowo – wodnym mogą występować, prócz postaci pierwotnej, w formie produktów reakcji. W przypadku syntezy glikoli cyklicznych powstają produkty trans- lub cis-, w zależności od wybranej metody. Utlenianie za pomocą KMnO_4 lub OsO_4 prowadzi do cis-diolei, a hydroliza epoksy-związków do trans-izomerów (Kołodziejczyk, 2011).

Potocznie nazwy glikol używa się również do określenia 1,2-dihydroksyetan (glikolu etylowego). Jest to najprostszy diol – alkohol polihydroksylowy. Substancja ta występuje w formie bezbarwnej, bezzapachowej gęstej cieczy o słodkawym posmaku.

Obecność glikolu etylenowego w środowisku gruntowo – wodnym najczęściej zachodzi przez rozproszenie związków zawierających omawianą substancję. Na składowisku „Zielona” zdeponowane glikole mogą być związane z odpadami surowców poprodukcyjnych i/lub

z wymienników ciepła. Procesowi biodegradacji glikolu towarzyszy spadek stężenia tlenu w środowisku. Podczas beztlenowej biodegradacji mogą powstawać względnie toksyczne produkty takie jak acetaldehyd C_2H_4O (aldehyd octowy), alkohol etylowy C_2H_6O (etanol), octany i metan CH_4 (EPA, 2000). Rozpad $t_{1/2}$ glikolu w powietrzu zachodzi po upływie około 10 dni, natomiast w wodach podziemnych oraz w gruncie czas ten wynosi kilka tygodni (CEP, Act. 1999).

Według badań laboratoryjnych oraz terenowych prowadzonych przez WHO (2000) glikol etylenowy wykazuje właściwości toksyczne, przede wszystkim na organizmy żyjące w środowisku wodnym, a co za tym idzie bioróżnorodność. Substancja ta ma właściwości teratogenne, a spożycie glikolu może skutkować śmiercią. Wystawienie na działanie substancji ma wyraźny wpływ m.in. na deformacje i niedorozwój szkieletu podczas formowania się płodu (CEP, Act. 1999).

8.3.6. Barwniki i półprodukty barwnikarskie

Podstawowymi zanieczyszczeniami przedostającymi się do środowiska gruntowo – wodnego, a pochodzące z produkcji barwników i pigmentów, to według EPA (2005) fenyloamina $C_6H_5NH_2$ (anilina), 1-amino-2-metoksybenzen C_7H_9NO (o-anizydyna), 4-chloro-benzoamina C_6H_6ClN (4-chloroanilina), 2-metoksy-5-metyloanilina $C_8H_{11}NO$, 1,2-diaminobenzen $C_6H_8N_2$ (1,2-fenylendiamina), 1,3-diaminobenzen $C_6H_8N_2$ (1,3-fenylendiamina) i 2,4-dimetyloanilina $C_8H_{11}N$.

Fenyloamina $C_6H_5NH_2$ (anilina) jest toksycznym związkiem organicznym, który najczęściej występuje w środowisku gruntowo – wodnym w związku z deponowaniem odpadów przemysłu barwnikarskiego. Zawiera grupę aminową ($-NH_2$) w pierścieniu benzenu. Występuje w postaci bezbarwnej, oleistej cieczy, która brunatnieje lub ciemnieje pod wpływem powietrza oraz promieniowania UV. Cechuje się ostrym, piekącym zapachem charakterystycznym dla aniliny (zapach zepsutych ryb). Przedział, w którym anilina jest wyczuwalna w powietrzu wynosi od 2 do 128 ppm (Keith, Walters, 1992).

Według badań Lyons i in. (1985) w warunkach strefy aerobowej jest biologicznie metabolizowana do n-fenyloformamidu C_6H_5NHCHO (formanilid), propioanilidu $C_9H_{10}NO$, 3,4-dichloroaniliny $Cl_2C_6H_3NH_2$ (3,4-DCA), 3-chloroaniliny C_6H_6ClN oraz 4-chloroaniliny C_6H_6ClN . Mikroorganizmy w środowisku gruntowym rozkładają anilinę do n-fenyloacetamidu C_8H_9NO (acetanilid), 2-hydroksyacetanilidu $C_8H_9NO_2$, 4-hydroksyacetanilidu $C_8H_9NO_2$ oraz dwóch niezidentyfikowanych fenoli (Smith, Rosazza, 1974). W gruncie, który nie jest zanieczyszczony anilina częściowo degraduje do difenyldiazenu $C_{12}H_{10}N_2$ (azobenzen), fenazyny $C_{12}H_8N_2$, n-fenyloformamidu C_6H_5NHCHO (formanilid), n-fenyloacetamidu C_8H_9NO (acetanilid) oraz wstępnie oznaczone związki nitrobenzen $C_6H_5NO_2$ i cykloheksa-2,5-dieno-1,4-dion $C_6H_4O_2$ (p-benzochinon) (Pillai i in. 1982).

Środowisko gruntowo – wodne na obszarze Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy zanieczyszczone jest związkami organicznymi z bezpośredniej produkcji barwników oraz pigmentów. W rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” anilina rozkłada się na o-dihydroksybenzen $C_6H_6O_2$ (pirokatechina), a ten z kolei do dwutlenku węgla. Podrzędnie zidentyfikowane substancje w większości reakcji dalszego rozpadu aniliny do: acetanilidu, n-fenylohydroksylaminy C_6H_7NO (hydroksyaminobenzen), kwas cis,cis-2,4-heksadienodiowy $C_6H_6O_4$ (kwas śluzowy), kwas β -ketoadypinowy $C_6H_8O_5$, kwas 4-oksowalerianowy $C_5H_8O_3$ (kwas lewulinowy) oraz kwas 1,4-butanodiowy $C_4H_6O_4$ (kwas bursztynowy) (Pillai i in. 1982).

Anilina wystawiona na działanie promieni UV, na powietrzu gwałtownie rozpada się w ciągu kilku dni. W środowisku gruntowo – wodnym czas połowicznego rozpadu $t_{1/2}$ wynosi około 21 dni, ale wykazuje tendencję do przylegania do cząsteczek stałych. Częściowo może ulegać ewapotranspiracji, natomiast znaczna część przedostaje się do wód podziemnych, a następnie podlega migracji w warstwie wodonośnej. Anilina nie ma tendencji do akumulowania (ATSDR, 2005), a parametry sorpcyjne wynoszą średnio K_{ow} $0,781 \div 1,09$ oraz K_{oc} $1,65 \div 2,11$ (Montgomery, 2000).

Anilina jest substancją trującą, toksyczną i potencjalnie mutagenną. Długotrwałe wystawienie na działanie związku ma destrukcyjny wpływ na czerwone krwinki, a co za tym idzie układ krwiotwórczy. Dawka śmiertelna wynosi $LD_{50(mysz)}$ wynosi 464 mg/kg (oral), a $LD_{50(szczur)}$ wynosi 250 mg/kg (oral), 1400 mg/kg (led) (RTECS, 1985).

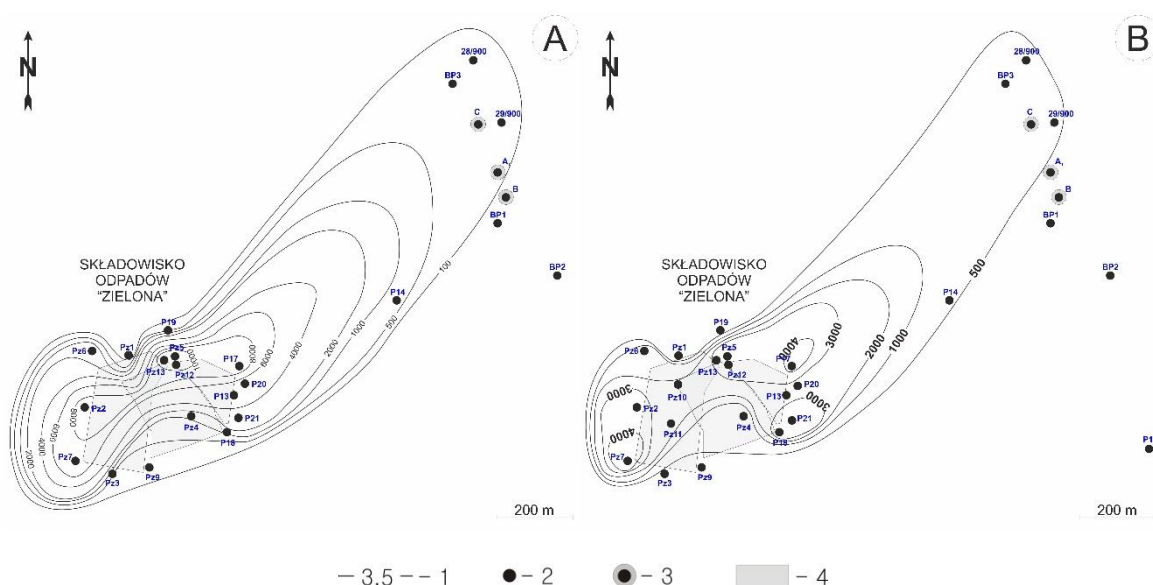
9. AKTUALNY STAN ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA NA OBSZARZE WYMAGAJĄCYM PRZEPROWADZENIE REMEDIACJI

9.1. Wody podziemne

9.1.1. Wyniki badań składu chemicznego wód podziemnych

Największy problem w ocenie stanu zanieczyszczenia środowiska gruntowo – wodnego stanowi określenie zasięgu chmury zanieczyszczeń związanej z ogniskiem zanieczyszczeń, które zazwyczaj jest lepiej znane. Przy czym ekstremalnie trudne jest to w przypadku wspólnej migracji wielu zróżnicowanych substancji organicznych i nieorganicznych. W związku z różną intensywnością procesów sorpcji i rozpadu chmura zanieczyszczeń wód składa się z wielu nakładających się na siebie chmur dla poszczególnych substancji chemicznych.

W odniesieniu do składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, najwyższe stężenia nieorganicznych chlorków (Cl⁻) oznaczono w bezpośrednim rejonie składowiska. w piezometrach Pz5, Pz12 i Pz13, gdzie średnie stężenie wynosi około 10 g/L. Chmura zanieczyszczeń częściowo rozprzestrzenia się w kierunku południowo – zachodnim, zgodnie z kierunkiem przepływu wód podziemnych w utworach czwartorzędowych na północny wschód do rzeki Wisły (Rys. 13a). Zanieczyszczenie ulega zatem rozciągnięciu w warstwie wodonośnej. podlegając jednocześnie procesowi stratyfikacji. Relatywnie najniższe stężenia chlorków oznaczono w rejonie frontu chmury zanieczyszczeń tj. w piezometrach sieci monitoringowej bariery odwadniającej: 28/900, 29/900, BP3 i III/3 średnio około 148 mg/L. Dla wód czwartorzędowych w tym rejonie wartość tła wynosi dla chlorków około 17 mg/L (piezometry BP1, BP2).



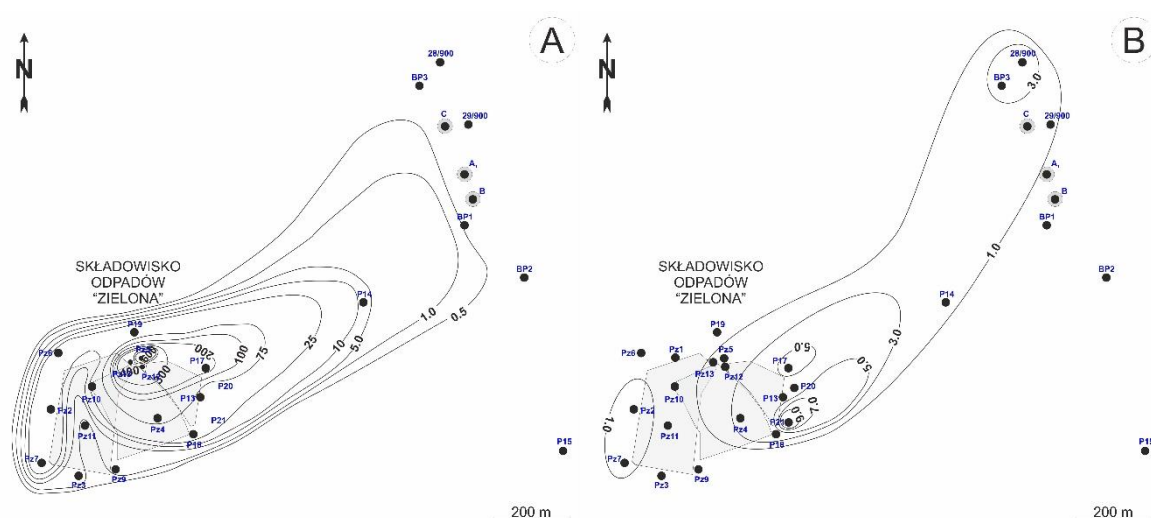
Rys. 13. Rozkład stężeń Cl^- (a) oraz Na^+ (b) w rejonie składowiska „Zielona”

*Legenda: 1 – izolinie stężeń substancji chemicznej. 2 – piezometr. 3 – studnie ujęcia barierowego. 4 – składowisko odpadów przemysłowych „Zielona”. Wszystkie rozkłady stężeń poszczególnych składników w rejonie składowiska „Zielona” wykreślone zostały dla stężeń oznaczonych w próbkach wód podziemnych pobranych z dennych części piezometrów.
Legenda obowiązuje dla Rys. 13 do Rys. 17.*

Migrującym chlorkom w środowisku gruntowo – wodnym towarzyszy sód (Na^+) (Rys. 14b). Najwyższe stężenie sodu wynosi w rejonie składowiska 4,4 g/L (P17), natomiast w studniach i sieci monitoringowej bariery odwadniającej około 600 mg/L (28/900, 29/900, III/3 i BP3). Zasięg oraz rozkład zanieczyszczenia sodem jest analogiczny do przedstawionego dla chlorków.

Chmura zanieczyszczeń w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” posiada bardzo złożoną strukturę. Składają się na nią bowiem liczne, nakładające się na siebie chmury, dla poszczególnych składników, zarówno organicznych jak i nieorganicznych. Po wstępnej analizie zasięgu zanieczyszczenia oraz rzeczywistych kierunków i prędkości migracji, można dokonać analizy pozostałych substancji chemicznych. Bardzo wysokie stężenia kolejnych substancji nieorganicznych oznaczono dla siarczanów. Siarczany wykazują bowiem bardzo wysokie stężenia przy składowisku, osiągając maksymalnie ponad 7,8 g/L (piezometr P21). Wartość ta przekracza kilkanaście razy poziom graniczny dla wód o niezadowalającej jakości (klasa IV) równy 0,5 g/L oraz tło hydrogeochemiczne $7,8 \div 58,64$ mg/L. Niższe stężenia siarczanów oznaczono w peryferycznych strefach chmury zanieczyszczeń (1,2 g/L, piezometry 28/900, BP3), natomiast poza obrysem chmury w rejonie bariery odwadniającej w próbkach wód z sieci monitoringowej oznaczono stężenia siarczanów na poziomie zaledwie około 7 mg/L (piezometr BP1).

W rejonie składowiska, podczas badań hydrogeochemicznych, oznaczono wysokie stężenia pierwiastków śladowych i metali w czwartorzędowych wodach podziemnych. W rejonie składowiska odpadów „Zielona” najwyższe stężenie żelaza w piezometrze Pz12 wynosi 800 mg/, natomiast w sieci monitoringowej ujęcia barierowego jego poziom maleje do wartości poniżej 0,5 mg/L (Rys. 14a). Zawartości żelaza przy składowisku znacznie przekraczają stężenia zarówno w odniesieniu do oznaczonego tła hydrogeochemicznego rejonu Bydgoszczy, w granicach 0,014 do 0,077 mg/L, jak i wartości granicznej dla wód o niezadowalającej jakości (klasa IV) równą 10 mg/L. Należy także zwrócić uwagę, iż oznaczone w wodach podziemnych stężenia manganu wykazują analogiczny rozkład jak żelazo (Rys. 14b). Najwyższe stężenia, w północnej części składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, wynoszą 15 mg/L (Pz5). Wartość ta znacznie przekracza tło hydrogeochemiczne ograniczone przedziałem stężeń od 0,001 do 0,037 mg/L oraz wartość graniczną dla wód o niezadowalającej jakości (klasa IV) równą 1 mg/L. Wraz z migracją Mn w chmurze zanieczyszczeń, jego stężenia maleją do poziomu poniżej 1 mg/L w rejonie bariery odwadniającej.



Rys. 14. Rozkład stężeń Fe (a) oraz Br^- (b) w [mg/L] w rejonie składowiska „Zielona”

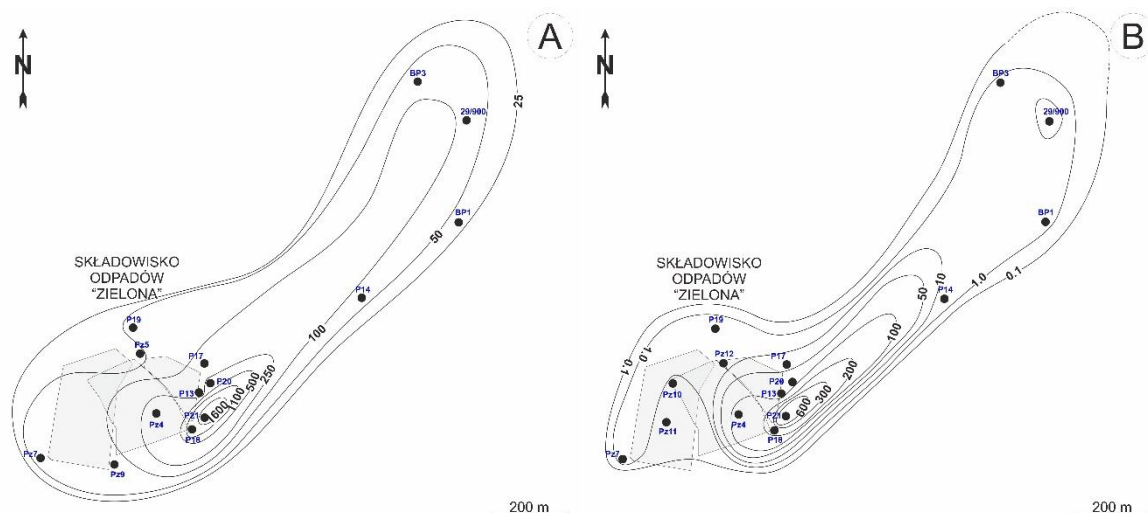
Na uwagę zasługują również bardzo wysokie stężenia pierwiastków jak bor, brom, stront, tytan i cynk. Odpowiednio maksymalne stężenia boru (B) oznaczono na poziomie 3,5 mg/L w piezometrze P21 przy średniej arytmetycznej z otworów strefy wpływu składowiska na środowisko gruntowo-wodne 0,48 mg/L. W niezanieczyszczonych wodach tego rejonu bor występuje tylko w nieznacznych ilościach do maksymalnie około 0,15 mg/L. Z kolei stężenia bromków w obrębie chmury zanieczyszczeń osiągają najwyższy poziom 10,6 mg/L (P21), średnio zaś stwierdzane są w ilości 2,06 mg/L. W niezanieczyszczonych wodach tego rejonu bromki występują tylko w minimalnych ilościach rzędu 0,02 mg/L. Stężenia pozostałych przytoczonych pierwiastków charakteryzują się najwyższymi stężeniami oznaczanymi w bezpośrednim sąsiedztwie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”. Maksymalne stężenia strontu (Sr) oznaczone w piezometrze Pz5 wyniosło 3,7 mg/L przy średniej 1 mg/L. Najwyższe stężenie tytanu (Ti) zostało oznaczone w piezometrze P18 na poziomie 1,3 mg/L przy średniej arytmetycznej 0,12 mg/L. Z kolei cynk (Zn) występuje w wodach czwartorzędowych w maksymalnym stężeniu 4,2 mg/L (piezometr P13) przy średniej 0,14 mg/L w chmurze zanieczyszczeń.

Nieorganicznym zanieczyszczeniom migrującym w chmurze zanieczyszczeń, będącej wpływem składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, towarzyszą współwystępujące substancje organiczne. Stężenia związków organicznych w chmurze zanieczyszczeń wyrażono za pomocą wskaźnika ogólnego węgla organicznego (TOC). Jest to parametr, który uwzględnia sumę wszystkich substancji organicznych występujących w roztworze wodnym, zarówno oznaczonych ilościowo i/lub jakościowo, jak i substancji nieujawnionych dotychczas. Analiza czwartorzędowych utworów w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wskazuje na występowanie w środowisku tylko nieznacznych ilości naturalnej materii organicznej (NOM). Poziom TOC dla naturalnych wód podziemnych zazwyczaj waha się w granicach rzędu 2 do 5 mg/L. Na obszarze badań wysokie wartości TOC wskazują na dominację związków organicznych pochodzenia antropogenicznego a powstałych w procesach syntezy chemicznej prowadzonej w warunkach Zakładów Chemicznych „Zachem”.

Występowanie TOC zidentyfikowano w całej strefie wpływu ogniska zanieczyszczeń (Rys. 15a), tj. w obrębie chmury zanieczyszczeń. Najwyższe stężenia w wodach podziemnych (1620 mg/L piezometr P21) obserwuje się w bezpośrednim sąsiedztwie składowiska „Zielona”. W peryferyjnych strefach chmury zanieczyszczeń, tj. w piezometrach sieci monitoringowej bariery odwadniającej, stężenia maleją do 33 mg/L (BP1). Maksymalny poziom stężeń TOC w obrębie chmury jest bardzo wysoki, przekraczając osiemdziesięciokrotnie wartość graniczną dla wód o niezadowalającej jakości (klasa IV) równą 20 mg/L. Podczas procesu migracji chmura zanieczyszczona TOC uległa naturalnemu procesowi stratyfikacji oraz rozciągnięciu w kierunku północno – wschodnim, tj. odpływu wód podziemnych do Wisły.

Głównym zanieczyszczeniem czwartorzędowych wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” w dawnych ZCh „Zachem, jak i w obrębie chmury zanieczyszczeń jest fenol. Substancja ta jest bezpośrednio związana z profilem produkcyjnym zakładów. Stężenia tego związku organicznego wskazują, iż obszar badań jest jednym z najbardziej zanieczyszczonych fenolem na świecie (Rys. 15b). Maksymalne zawartości fenolu stwierdzono w rejonie składowiska, gdzie wynoszą one 613 mg/L (piezometr P21). Na skutek dyspersji oraz rozpadu tego związku w obrębie chmury

zanieczyszczeń jego stężenie sukcesywnie maleje do wartości 1,19 mg/L (piezometr BP1) w wodach podziemnych pobranych z piezometrów obserwacyjnych za barierą odwadniającą.



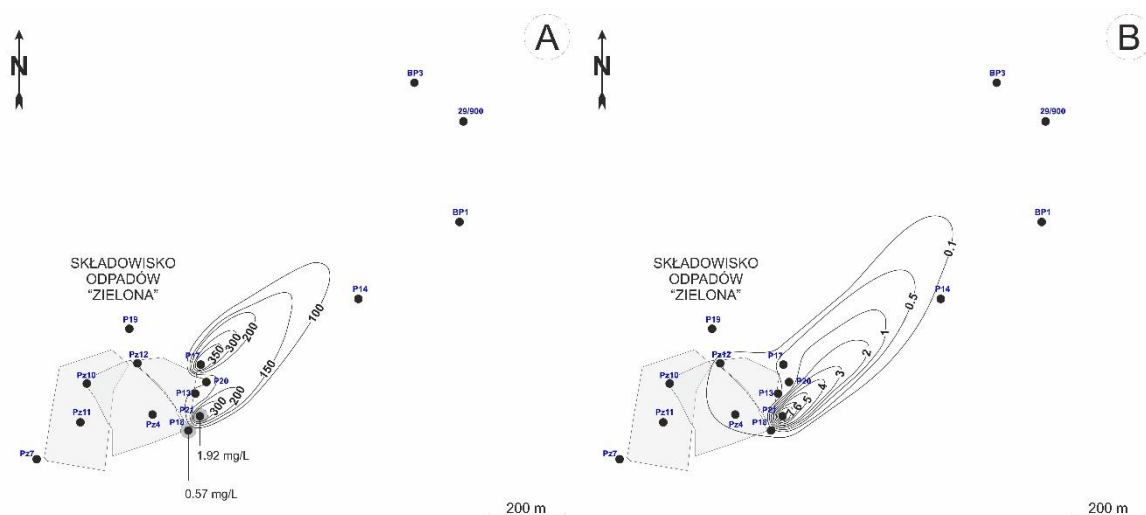
Rys. 15. Rozkład stężeń TOC (a) oraz fenolu (b) w [mg/L] w rejonie składowiska „Zielona”

W rejonie składowiska odpadów „Zielona” stwierdza się również wysokie stężenia chloroaniliny ($\text{ClC}_6\text{H}_4\text{-NH}_2$) i aniliny ($\text{C}_6\text{H}_5\text{-NH}_2$) oraz toluidyny ($\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4\text{-NH}_2$). Substancje te wykorzystywane są w procesie produkcyjnym barwników. Zanieczyszczenia te rozprzestrzeniają się w środowisku analogicznie do wymienionych wcześniej substancji, a procesem decydującym o opóźnieniu ich migracji w warstwie wodonośnej jest sorpcja i rozpad.

Najwyższe stężenia chloroaniliny oznaczono w dwóch punktach w rejonie składowiska odpadów „Zielona” - 370 $\mu\text{g/L}$ (P17) oraz 330 $\mu\text{g/L}$ (P21) (Rys. 16a). Substancja organiczna migruje początkowo w formie dwóch chmur zanieczyszczeń, które następnie łączą się ze sobą. Zanieczyszczenie wód podziemnych chloroaniliną w dawnych Zakładach Chemicznych „Zachem” nie dotarło do bariery odwadniającej, podobnie jak toluidyna, która występuje w rejonie składowiska „Zielona” w bardzo wysokich stężeniach około 8 mg/L (P21) (Rys. 16b). Obecność aniliny w wodach podziemnych rejonu składowiska „Zielona” wykryto tylko w dwóch piezometrach. Stężenia wynoszą 1,92 mg/L (P21) oraz 0,7 mg/L (P18) (Rys. 16a). Anilina w środowisku gruntowo – wodnym w rejonie składowiska występuje w formie pierwotnej. Nie jest produktem rozpadu ani chloroaniliny na skutek dehalogenacji, ani produktem rozpadu toluidyny.

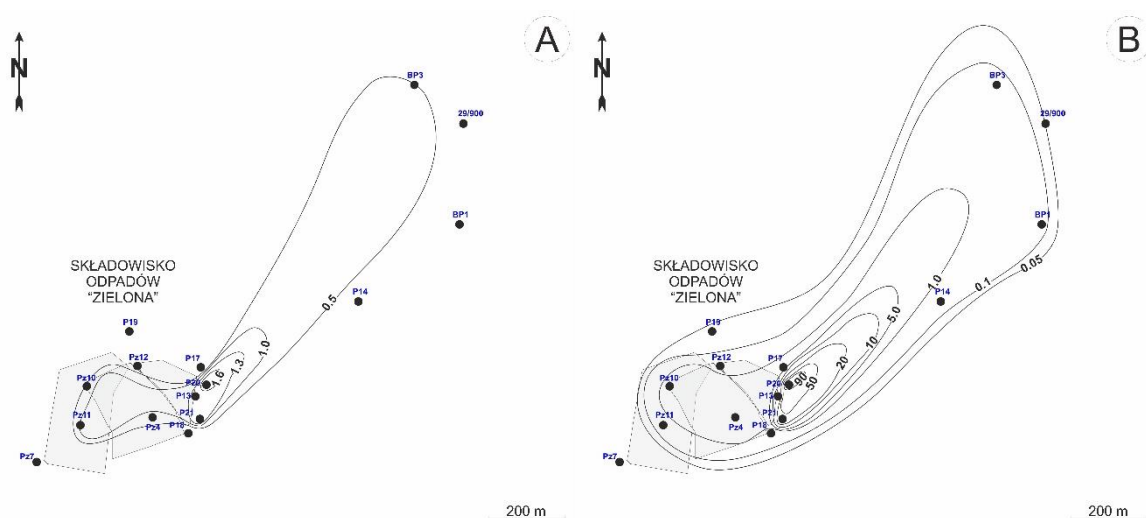
Wszystkie chmury zanieczyszczeń dla omówionych amin wykazują rozciągnięcie w kierunku północno – wschodnim, do rzeki Wisły oraz uległy naturalnemu procesowi dyspersji w przestrzeni.

W rejonie składowiska „Zielona” stwierdzono również zanieczyszczenie wód podziemnych bardzo rzadkimi związkami chemicznymi: oktylofenolami $\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}$ oraz estrami oktylofenolooksyetylowymi. Stężenie sumy związków wynosi w rejonie składowiska „Zielona” 1,8 mg/L (P20) (Rys. 17a). Prawdopodobne pochodzenie substancji jest także pierwotne, z uwagi na ich wykorzystanie podczas produkcji żywic epoksydowych i fenolowych oraz barwników.



Rys. 16. Rozkłady stężeń chloroaniliny (izolinie [$\mu\text{g/L}$] i aniliny (punktowo) (a) oraz toluidyny [mg/L] (b) w rejonie składowiska „Zielona”

Analizując przestrzenny rozkład stężeń hydroksybifenyli w rejonie składowiska, można dostrzec analogię do migracji większości związków organicznych w Zakładach Chemicznych (Rys. 17b). Obecność związków wykryto we wszystkich próbkach wody poddanych analizie. Najwyższe stężenie ($92,41 \text{ mg/L}$ - piezometr P20) oznaczono w bezpośrednim rejonie składowiska. Wartości najniższe występują w peryferycznych strefach chmury, osiągając stężenie $0,05 \text{ mg/L}$ w wodach pobranych z piezometrów sieci monitoringowej bariery odwadniającej (29/900, BP1, BP3). Wskazuje to na fakt, iż chmura zanieczyszczeń przekroczyła granicę studni odwadniających i stanowi realne zagrożenie zdrowia mieszkańców terenów znajdujących się na odpływie wód w kierunku Wisły.



Rys. 17. Rozkład stężeń oktylofenolu i estrów oktylofenolooksyetylowych (a) oraz hydroksybifenylu (b) w [mg/L] w rejonie składowiska „Zielona”

Podczas wykonanych analiz chemicznych wód podziemnych wykryto dodatkowo zanieczyszczenie difenylosulfonem, którego obecność w rejonie składowiska związana jest z prawdopodobną produkcją pestycydów w Zakładach Chemicznych „Zachem”, bądź niezorganizowaną depozycją na

składowisku przez inne podmioty (Narwojsz, 1989). Maksymalne stężenie substancji wynosi 0,63 mg/L (P21). Rozkład przestrzenny zanieczyszczenia w chmurze jest analogiczny jak fenolu.

Najwyższe stężenia AOX w wodach podziemnych (5,38 mg/L, piezometr P13) obserwuje się w rejonie składowiska „Zielona”. W peryferyjnych strefach chmury zanieczyszczeń stężenia maleją do wartości 1,79 mg/L (29/900) za barierą odwadniającą. Poziom stężenie AOX w obrębie chmury jest bardzo wysoki, przekraczając o około kilkadziesiąt razy wartość graniczną dla wód o niezadowalającej jakości (klasa IV) równą 0,3 mg/L. Podczas procesu migracji chmura zanieczyszczona związkami AOX uległa naturalnemu procesowi dyspersji oraz rozciągnięciu w kierunku północno – wschodnim, tj. odpływu wód podziemnych do Wisły. W warunkach migracji występować może również rozkład związków haloorganicznych, skutkujący zmianą warunków redox w warstwie wodonośnej. Jako skutek powyższych procesów peryferyjne strefy chmury zanieczyszczeń charakteryzują się obniżonymi wartościami Eh w wodach podziemnych w stosunku do rejonu centrum składowiska.

9.1.2. Model numeryczny migracji zanieczyszczeń

Głównym celem wykonania modelu prognostycznego migracji zanieczyszczeń jest odwzorowanie kierunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”. Z uwagi na bardzo skomplikowane warunki hydrogeologiczne omawianego obszaru, problematyka migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych jest bardzo złożona.

Tab. 6. Stężenia Cl⁻, Na⁺ i fenolu w [mg/L], wykorzystane na etapie kalibracji i weryfikacji modeli migracji zanieczyszczeń w rejonie składowiska „Zielona”

piezometr	stężenie Cl ⁻ [mg/L]		stężenie Na ⁺ [mg/L]		stężenie fenolu [mg/L]	
	zmierzone	obliczone	zmierzone	obliczone	zmierzone	obliczone
P13	5468 ÷ 5652	5000	2600 ÷ 2989	2762	48,70	50,00
P17	6835 ÷ 8924	6523	2574 ÷ 4405	2585	15,90	19,41
P18	993 ÷ 1680	1578	2872 ÷ 3570	3500	253,40	300,00
P20	467 ÷ 4016	4507	406 ÷ 2379	2500	69,90	50,00
P21	2217 ÷ 4916	2112	1565 ÷ 3669	2585	612,90	400,00
Pz2	104 ÷ 9774	5000	33 ÷ 3520	3500	-	2,00
Pz4	1244 ÷ 1446	1806	645 ÷ 722	652	179,70	130,19
Pz5	9391 ÷ 9859	8000	3417 ÷ 3524	3500	2,97	2,00
Pz7	32 ÷ 8500	498	15 ÷ 4243	4500	2,37	2,00
Pz12	4791 ÷ 9333	8000	1614 ÷ 3257	3500	-	10,00
Pz13	10282 ÷ 10969	10000	3690 ÷ 3792	3500	-	2,00
BP3	159 ÷ 175	102	538 ÷ 668	502	6,44	2,00
P14	714 ÷ 749	1008	795 ÷ 817	782	5,76	2,00

Dla potrzeb modelowania migracji zanieczyszczeń w środowisku gruntowo – wodnym wykorzystano numeryczny model hydrogeologiczny wspomnianego obszaru. Aby odwzorować rzeczywiste warunki

migracji substancji organicznych i nieorganicznych w warstwie wodonośnej wykonano 3 scenariusze modelu migracji, które mają na celu przedstawienie zróżnicowanego charakteru rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w odniesieniu do ich specyficznych właściwości fizyko – chemicznych. Modelowanie migracji zanieczyszczeń było prowadzone z wykorzystaniem silnika obliczeniowego MT3DMS v.5.1., a ognisko zanieczyszczeń zasymulowano warunkiem brzegowym dla migracji *Constant Concentration*.

Kalibracji oraz weryfikacji 3 modeli migracji zanieczyszczeń w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” dokonano na podstawie rzeczywistych pomiarów terenowych w piezometrach, wykonanych podczas badań hydrogeologicznych w roku 2012 (Tab. 6).

Interpretacja wyników badań modelowych wskazuje, iż migracja substancji nieorganicznych odbywa się równolegle, a zasięgi chmur zanieczyszczeń są podobne. Jony chlorkowe migrują zatem jednocześnie z sodem. Ta sama chmura, o charakterze silnie zróżnicowanym w swoim obrębie, jest jednocześnie zanieczyszczona współwystępującymi w środowisku gruntowo – wodnym substancjami organicznymi, w tym fenolem.

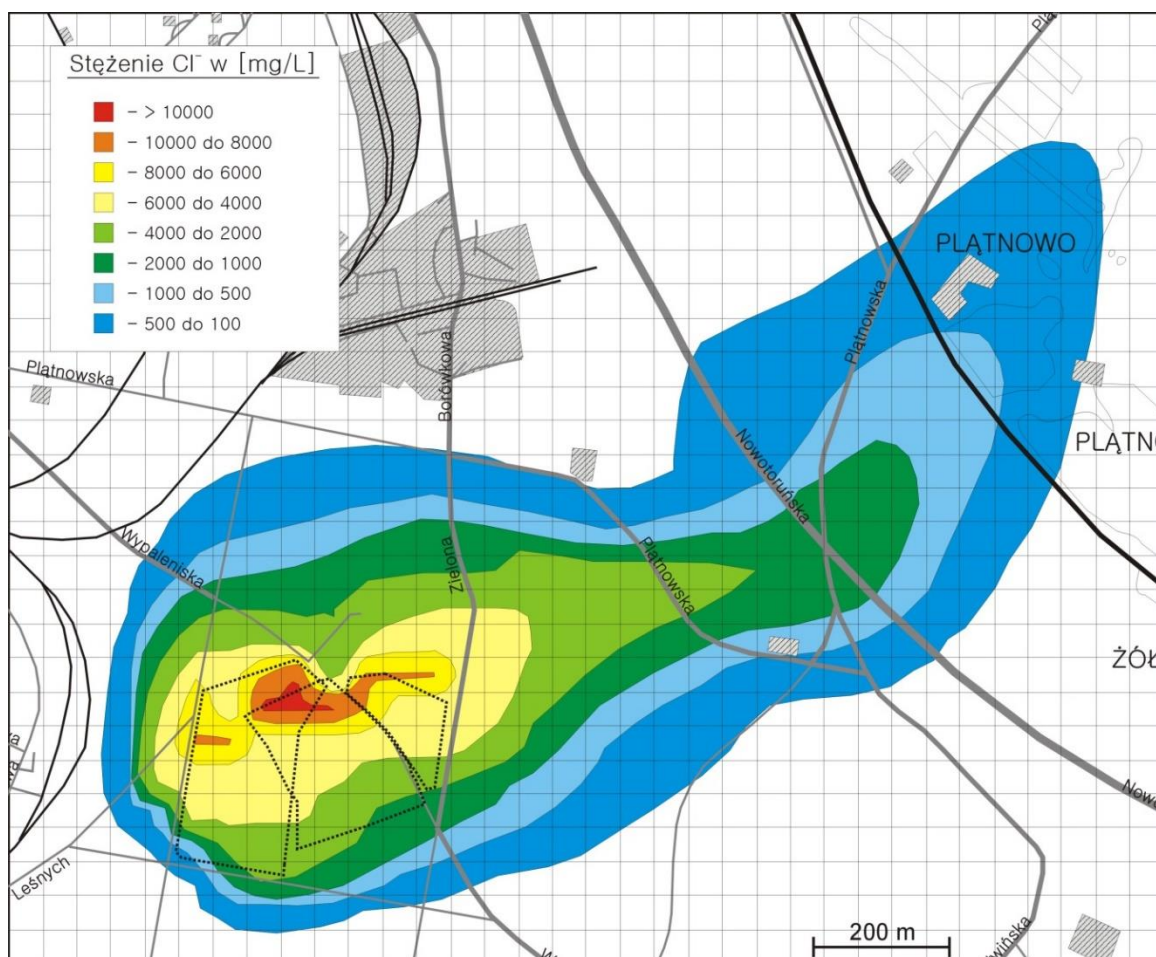
Najistotniejszy jednak wynik modelowania, został osiągnięty przez rozwiązanie zadania odwrotnego. Z uwagi na bardzo skomplikowane warunki hydrogeologiczne omawianego obszaru oraz współwystępowanie substancji organicznych i nieorganicznych bardzo istotnym aspektem jest pozyskanie parametrów charakteryzujących warstwę wodonośną, w której odbywa się migracja, a które są wymagane przez programy wykorzystywane w procesie modelowania. Parametry, których pomiar był niemożliwy w terenie uzyskano podczas kolejnych iteracji na modelu. W ten sposób uzyskano wartości: współczynników filtracji utworów przepuszczalnych, ładunków zanieczyszczeń zdeponowanych w ognisku oraz parametrów migracyjnych K_d i K_{oc} . Parametrów opisujących proces migracji nie da się bowiem odtworzyć podczas badań laboratoryjnych (tj. testy batch, badania kolumnowe) z uwagi na problem skali.

9.1.3. Zasięg chmury zanieczyszczeń

Rozpoczynając określenie zasięgu chmury zanieczyszczeń można się skoncentrować na składnikach o charakterze konserwatywnym. Wskaźnikiem tym jest jon chlorkowy, który nie uczestniczy w procesach utleniania i redukcji, prawie nie bierze udziału w procesach adsorpcyjno – wymiennych, w bardzo ograniczonym zakresie tworzy związki kompleksowe, jest najszybciej migrującym jonem w wodach podziemnych (Hem, 1970; Perelman, 1971; Macioszczyk, 1987). Można go wykorzystywać do oceny prędkości rzeczywistej przepływu wód podziemnych w charakterze znacznika oraz do oceny kierunków przepływu wód. Przyjęcie możliwie najgorszego scenariusza migracji, pozwala na określenie maksymalnego i realnego zasięgu chmury zanieczyszczeń.

Pierwszy, najgorszy scenariusz zakłada migrację zanieczyszczeń składników konserwatywnych, tj. nie ulegających jakimkolwiek reakcjom z fazą ciekłą (wodą) i stałą (gruntem) w trakcie przemieszczania się w strumieniu wód podziemnych. W charakterze składnika konserwatywnego (niereaktywnego) wybrano do badań modelowych jony chlorkowe (Cl^-), migrujące w środowisku wodnym z prędkością wody (Rys. 18). Uzyskany zasięg wytypowanych składników konserwatywnych odpowiada maksymalnemu zasięgowi chmury zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych

„Zielona” w Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, przy czym na Rys. 18. zaprezentowano zasięg izolinii stężenia chlorków 100 mg/L, co przekracza ponad 5 razy tło hydrogeochemiczne (9 do 18 mg/L). Stężenie zanieczyszczeń Cl⁻ w ognisku zadano na poziomie 5000, 8000 oraz 10000 mg/L, zgodnie ze zróżnicowaniem ładunku zdeponowanego na składowisku odpadów przemysłowych „Zielona”.

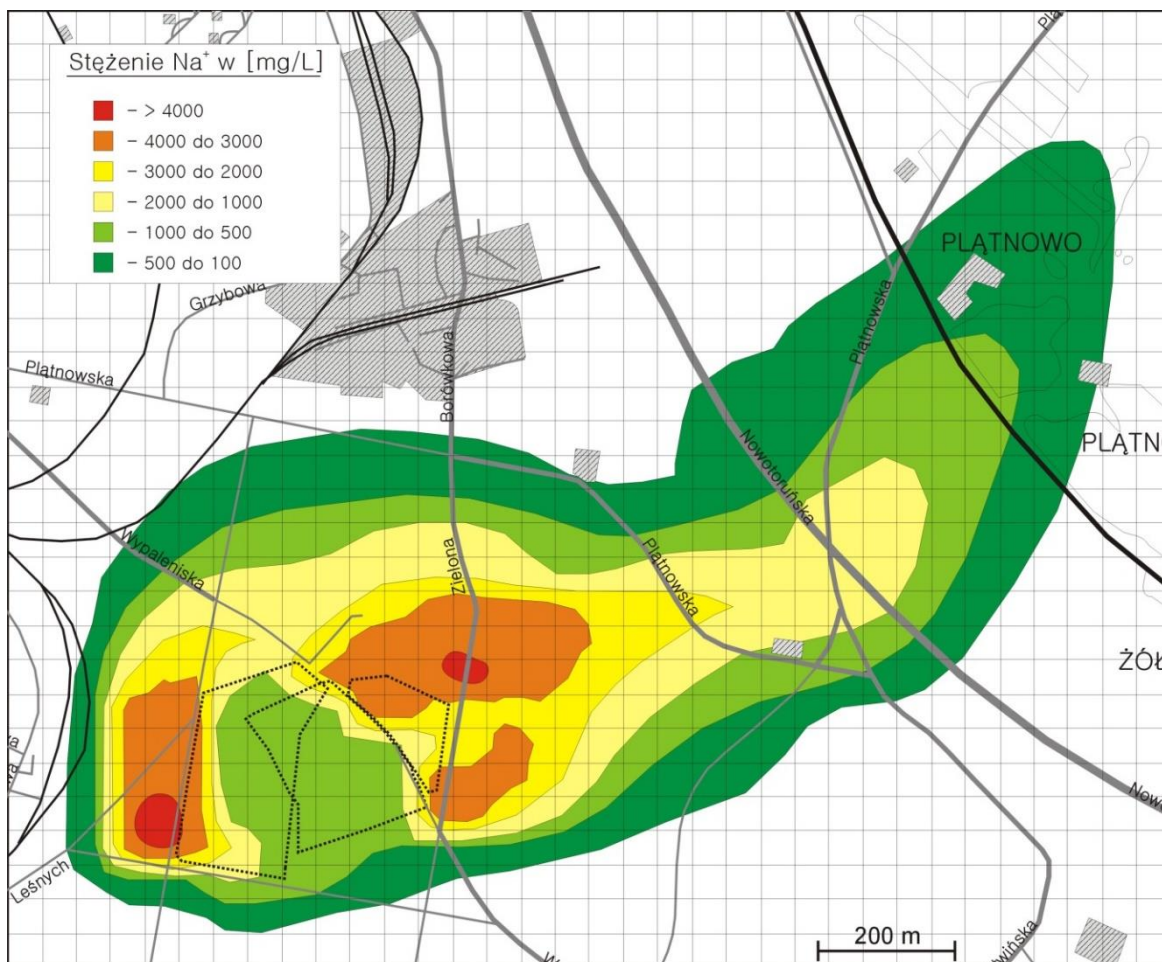


Rys. 18. Mapa migracji chlorków (Cl⁻) w rejonie składowiska odpadów „Zielona”

(Chmura zanieczyszczeń reprezentuje t = 18250 dni, tj. 50 lat - stan na 2015)

Drugi scenariusz modelowania transportu masy w wodzie podziemnej zakłada migrację zanieczyszczenia, które ulega w strumieniu wód podziemnych procesowi sorbowania na fazie stałej (gruncie). W charakterze składnika zdolnego do sorpcji wybrano do badań modelowych sól (Na⁺) (Rys. 19). Zasięg chmury zaprezentowano dla stężenia sodu 100 mg/L, przekraczającego około 25 razy tło hydrogeochemiczne (3,37 do 4,71 mg/L). Stężenie zanieczyszczeń Na⁺ w ognisku zadano na poziomie 3500 i 4500 mg/L.

Trzeci scenariusz dostosowany został do migracji charakterystycznych substancji organicznych występujących w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, które prócz migracji w strumieniu wód podziemnych i procesowi sorpcji ulegają także rozpadowi w warstwie wodonośnej. W charakterze takiej substancji organicznej wybrano fenol, występujący w znacznych stężeniach w rejonie składowiska (Rys. 20).



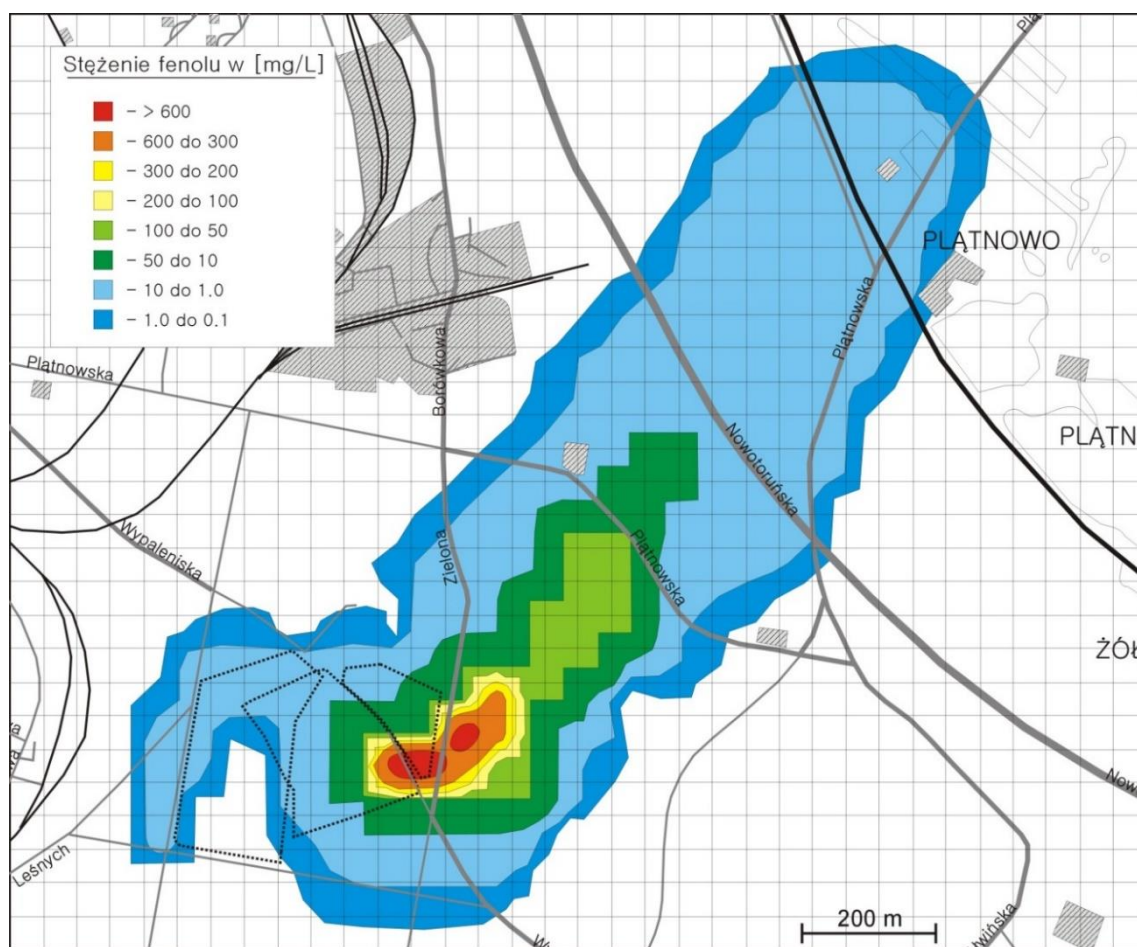
Rys. 19. Mapa migracji sodu (Na^+) w rejonie składowiska odpadów „Zielona”

(Chmura zanieczyszczeń reprezentuje $t = 18250$ dni, tj. 50 lat - stan na 2015)

Podczas analizy migracji substancji organicznych, istotnymi parametrami opisującymi proces rozpadu są wspomniane wcześniej:

$$K_d = K_{oc} \cdot f_{oc} \quad K_{oc} = 0.63 \cdot K_{ow} ,$$

a stała podziału jest proporcjonalna do zawartości frakcji węgla organicznego w warstwie wodonośnej. W tym celu oznaczono frakcję węgla w utworach geologicznych budujących strefę aeracji i warstwę wodonośną zgodnie z normą PN-ISO 14235:2003. Średnia zawartość, badana na 5 próbkach gruntu, wynosi 1,0%. Podczas modelowania migracji zanieczyszczeń fenolu, przyjęto wartości odpowiednio: $K_d = 0,0121$; $K_{oc} = 1,21$ oraz $K_{ow} = 1,92$ na podstawie danych literaturowych (Montgomery, 2000) i zweryfikowano na modelu zarówno na etapie kalibracji, jak i weryfikacji. Stężenie fenolu zadane w ognisku wynosi 400 i 850 mg/L, a współczynnik dyspersji $D_L = 100$ m.



Rys. 20. Mapa migracji fenolu w rejonie składowiska odpadów „Zielona”

(Chmura zanieczyszczeń reprezentuje $t = 18250$ dni, tj. 50 lat - stan na 2015)

Kolejne wykonywane po sobie iteracje na modelu wykazały, iż początkowo przewidywany proces sorpcji na fazie stałej (gruncie), towarzyszący migracji sodu i fenolu, w rzeczywistości nie zachodzi i/lub zachodzi na poziomie do pominięcia. Sód migruje w charakterze składnika konserwatywnego, a fenol ulega wyłącznie reakcji pierwszego rzędu, tj. rozpadowi. Stan ten warunkują bardzo wysokie stężenia chlorków (11,0 g/L) oraz sodu (4,0 g/L), które znacząco ograniczają proces sorpcji zarówno substancji nieorganicznych, jak i organicznych. Nieznaczny wpływ ma również litologia warstwy wodonośnej, w której odbywa się migracja zanieczyszczeń. Zbudowana jest z kwarcowych piasków pochodzenia eolicznego, miejscami o dużej granulacji dochodzącej do frakcji żwiru. Taki materiał skalny nie sprzyja sorpcji, z uwagi na duże przestrzenie porowe.

9.2. Wody powierzchniowe

Głównymi ciekami będącymi bazą drenażu wód podziemnych w rejonie dawnych ZCh „Zachem” są rzeki Wiśła i Brda. Chmura zanieczyszczeń będąca wpływem składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na środowisko gruntowo – wodnego pozostaje jednak pod wpływem wyłącznie Wiśły. Jakość wód w Wiśle na odcinku bydgoskim w ocenie biologicznej, fizykochemicznej i hydromorfologicznej prezentuje II klasę. Stan/potencjał ekologiczny jest dobry, tak jak stan chemiczny. Warto zwrócić uwagę, iż na odpływie Wiśły z rejonu dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy stan wody w Wiśle pogarsza się, osiągając stan umiarkowany (WIOŚ, 2015).

Badania WIOŚ prezentowane na spotkaniach roboczych w Bydgoszczy udowodniły, że w wodach powierzchniowych Wisły oznaczono występowanie fenolu, który jest bezsprzecznie powiązany genetycznie z produkcją prowadzoną w zakładach chemicznych. Należy jednak zwrócić uwagę na bardzo duży przepływ wód w korycie Wisły, co oznacza, że sam fakt wykrycia fenolu świadczy o ekstremalnie dużym ładunku zanieczyszczeń dopływających do rzeki.

Inne, szczegółowe badania wód powierzchniowych nie były prowadzone na terasie Wisły i w jej korycie. Należy mieć jednak pełną świadomość, że zanieczyszczone wody podziemne zalegają bardzo płytko (od 1 do 3 m p.p.t) w obrębie terasy i potencjalnie zanieczyszczają wody powierzchniowe substancjami o charakterze toksycznym, mutagennym i często kancerogennym. Stan aktualnego rozpoznania jakości i stanu wód powierzchniowych wyraźnie wskazuje na potrzebę zintensyfikowania badań w tym zakresie.

9.3. Gleby i grunty

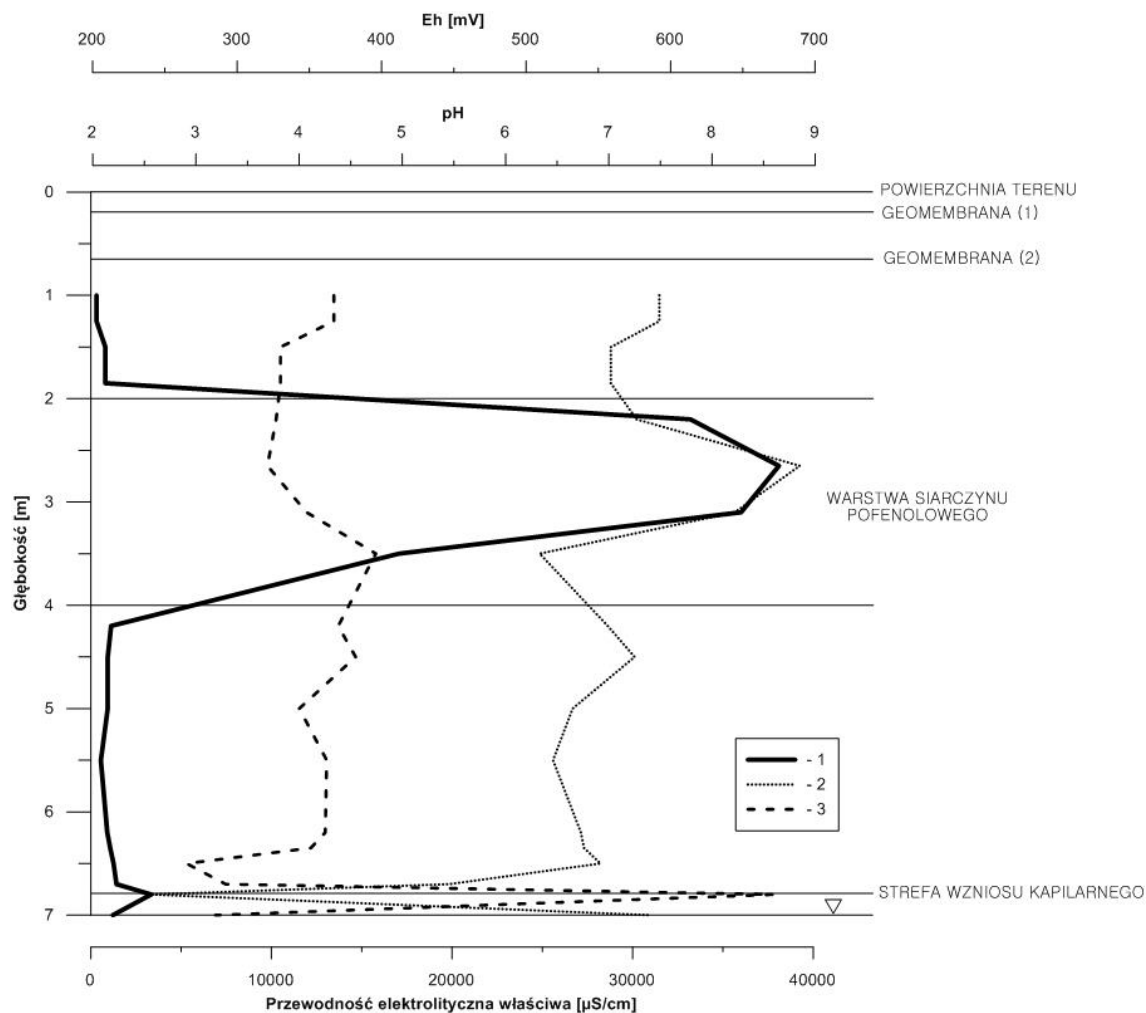
Analizując stan gleb i gruntów na składowisku przemysłowym, mają one charakter zanieczyszczony i/lub pod nimi silnie skażony toksycznymi substancjami organicznymi o charakterze kancerogennym i mutagennym (Fot. 4, 5). Najwyższe zmierzone stężenia np. 2-fenylofenolu (bifenylu) wynosiły 22 000 mg/kg w suchej masie, a fenolu 8 960 mg/kg, przy czym w bryle składowiska 74 030 mg/kg (Andrzejewski, 2010). Wyniki te jednoznacznie wskazują, że fragmentarycznie grunty są przesycone zanieczyszczeniem, a ich rodzaj jest bezpośrednio związany z profilem produkcyjnym zakładów i rodzajem substancji deponowanej na składowiskach.



Fot. 4. Grunt zanieczyszczony fenolem w rejonie składowiska „Zielona” (fot. D. Pierri)

Podczas badań AGH wykonało szereg operacji na próbkach gruntu pobranych w terenie (rok 2015). Materiał pochodzący z odwiertów, zarówno z bryły składowiska, jak i ze strefy aeracji poniżej składowiska, poddano badaniu wymywalności (PN-EN 12457-2:2006). Badania wykonano na 24 próbkach przy $L/S=2$ lub $L/S=10$, w zależności od ilości dostępnego materiału. Eluaty po

przefiltrowaniu (0,45 μm) i pomiarze parametrów fizykochemicznych (PEW, Eh, pH, T) były analizowane dla określenia stężeń substancji organicznych i nieorganicznych, zgodnie z zakresem wykonanym dla wód podziemnych. Wyniki badań pozwoliły na określenie pionowej zmienności zanieczyszczeń występujących w strefie aeracji (Rys. 21).



Rys. 21. Parametry fizykochemiczne w eluatach przy $L/S = 10$ na składowisku „Zielona” (Pietrucin, 2015)

Legenda: 1 – przewodność elektrolityczna właściwa (25°C), 2 – pH, 3 – Eh

Najwyższe wartości przewodności elektrolitycznej właściwej (38100 $\mu\text{S/cm}$) w eluatach $L/S=10$ odpowiadają głębokości, na której zalega wtórnie zrekrytalizowany siarczyn sodowy silnie zanieczyszczony fenolem. Poniżej warstwy fenolu eluaty mają PEW równą około 1300 $\mu\text{S/cm}$. Biorąc pod uwagę stopień rozcieńczenia $L/S=10$ wartość ta wskazuje na wysoki stopień wymywania zanieczyszczeń z warstwy siarczynu pofenolowego. Próbkom tym towarzyszą wysokie wartości odczynu pH (8,85), które następnie nad strefą wzniosu kapilarnego maleją do wartości 2,56.

W przypadku dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, a w szczególności składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, zanieczyszczenie gleby i gruntu jest najczęściej wynikiem zdarzenia mającego miejsce na powierzchni terenu, gdzie wskutek różnego rodzaju zdarzeń, w tym awarii, następuje emisja zanieczyszczeń w formie: (a) stałej - np. poprzez pylenie, rozsypanie, wywiewanie zanieczyszczeń ze składowiska w formie stałej, (b) ciekłej - przeniknięcie

zanieczyszczenia z powierzchni do gruntu, a następnie dalsza infiltracja do wód podziemnych będąca często skutkiem awarii, takich jak przebicia kanalizacji ściekowej i rurociągów materiałów płynnych (np. paliwa, roztwory chemiczne i solanki) lub bezpośrednie wylanie roztworów i ścieków na powierzchnię. Zanieczyszczenia ciekłe mają dużą łatwość penetracji wierzchniej warstwy podłoża gruntowego i mogą przenikać do jego głębszych partii. Ten sam skutek ma proces rozpuszczania przez wody opadowe zanieczyszczeń wprowadzonych do środowiska w formie stałej, a następnie przenikanie tego roztworu do podłoża.



Fot. 5. Zrekrystalizowany siarczyn sodowy silnie zanieczyszczony fenolem (fot. D. Pierri)

Zanieczyszczenia gruntu na dużych głębokościach, w tym w szczególności w strefie zawodnionej, zazwyczaj są przyczyną emisji substancji z ogniska powierzchniowego. Dochodzi przy tym do zanieczyszczenia wód podziemnych, a następnie napłynięcia chmury zanieczyszczeń (bocznego) do pewnej strefy gruntu nawet na głębokości kilkunastu-kilkudziesięciu metrów, w znacznej odległości od pierwotnego ogniska zanieczyszczeń. Strefa zanieczyszczonego gruntu jest zdeterminowana przez kierunek i prędkość ruchu wód podziemnych.

9.4. Flora i fauna

Badania wpływu zanieczyszczonych wód podziemnych w chmurze wypływającej ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na florę i faunę nie były dotychczas prowadzone przez żadną jednostkę, w tym naukową. Należy jednak spodziewać się, że współwystępujące substancje organiczne i nieorganiczne w bardzo wysokich stężeniach nie pozostają bez wpływu na środowisko roślin i/lub zwierząt.

10. OCENA WYSTĘPOWANIA ZNACZĄCEGO ZAGROŻENIA DLA ZDROWIA LUDZI ORAZ STANU ŚRODOWISKA

10.1. Zagrożenie dla zdrowia ludzi

Migracja chmury zanieczyszczonych wód podziemnych ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na tereny zamieszkałe jest problemem powodującym bezpośrednie zagrożenie zdrowia, a nawet życia lokalnych mieszkańców Bydgoszczy i pobliskich wsi: Otorowo, Płatnowo i Łęgowo. Obecnie bowiem, wobec wyłączenia bariery odwadniającej chmura zanieczyszczeń z rejonu składowiska „Zielona” ma możliwość swobodnej migracji na teren wykorzystywany w celach rolniczych i mieszkalnych. Poprzez bezpośredni kontakt mieszkańców ze skażoną wodą, która ujawnia się m.in. w studniach kopanych, narażeni są na wchłanianie substancji organicznych o charakterze mutagennym, toksycznym, a często także klasyfikowanych jako kancerogenne.

Pośród substancji zaklasyfikowanych jako jedne z najbardziej niebezpiecznych wymienić należy fenol oraz anilinę. Fenol zdeponowany na składowisku „Zielona” w Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy jest związany bezpośrednio z produkcją fenolu oraz produktów pośrednich jak kleje fenolowo – formaldehydowe. Odpad ten stosunkowo łatwo dostępny na składowisku w formie częściowo zrekrystalizowanej i częściowo odsłonięty, stanowi realne zagrożenie dla zdrowia. Toksyczność fenolu jest duża. Przypuszcza się, że powoduje wady genetyczne i wywołuje mutacje genowe. Dawka śmiertelna $LD_{50(szczur)}$ wynosi 340 mg/kg (oral), 660 mg/kg (led), $>900 \text{ mg/m}^3$ (8h, inh) (INEOS Phenol, 2014). Dawka śmiertelna dla człowieka przy przyjęciu fenolu doustnie ustalona została na poziomie ok. 10 g. Oczywiście czysto teoretycznie, jest to równoznaczne z wypiciem około 1,5 L zanieczyszczonej wody pochodzącej z bezpośredniego rejonu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”. Mieszkańcy terasy Wisły są wystawieni na przewlekłe działanie fenolu, poprzez potencjalny kontakt z substancją rozpuszczoną w wodzie. W warunkach zatrucia przewlekłego można obserwować objawy: nieżyty górnych dróg oddechowych, zaburzenia w trawieniu, ogólne osłabienie organizmu, nerwowość, bezsenność, a nawet uszkodzenie nerek, ale także zmiany skórne takie jak zaczerwienienie, poparzenia i pojawianie się pęcherzy.

Kolejną substancją organiczną zawartą w wodach podziemnych, a oznaczoną w studniach przydomowych jest anilina. Jest substancją trującą, toksyczną i potencjalnie mutagenną. Długotrwałe wystawienie na działanie związku ma destrukcyjny wpływ na czerwone krwinki, a co za tym idzie układ krwiotwórczy. Dawka śmiertelna wynosi $LD_{50(mysz)}$ wynosi 464 mg/kg (oral), a $LD_{50(szczur)}$ wynosi 250 mg/kg (oral), 1400 mg/kg (led) (Sorensen, 1985). Inne niekorzystne skutki spożycia to: nasilenie się objawów astmy, dolegliwości żołądkowo-jelitowe oraz nadpobudliwość u dzieci.

10.2. Zagrożenie dla stanu środowiska

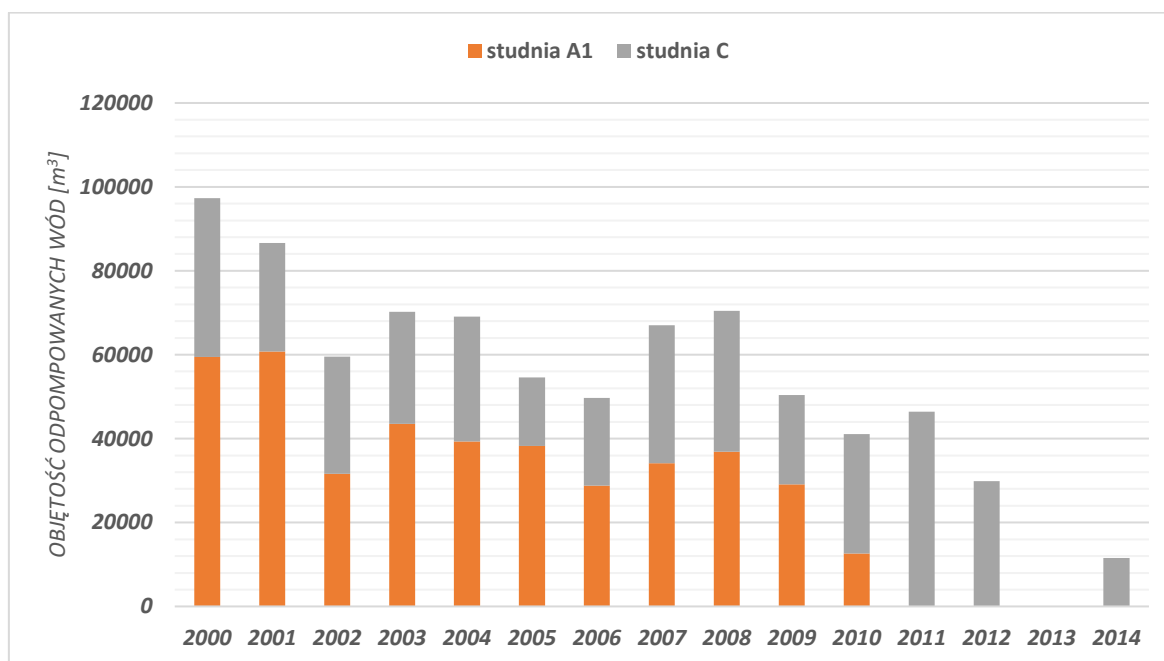
Substancje migrujące w chmurze zanieczyszczonych wód podziemnych mają wpływ nie tylko na jakość życia lokalnych mieszkańców, ale i na całe środowisko naturalne. Substancje organiczne są często bowiem ekotoksyczne, to znaczy, że działają szkodliwie na organizmy żywe. Szczególnym przypadkiem jest m.in. anilina działająca destrukcyjnie na wszelkie organizmy wodne.

Ponadto zdolności magazynujące roślin, zarówno drzew jak i roślin o płytkim systemie korzeniowym są bardzo duże. Zanieczyszczenia bowiem mogą być pobierane przez rośliny na różnych głębokościach, zarówno na wysoczyźnie w rejonie składowiska, jak i na terasie, gdzie zwierciadło wód zalega płytko. Potencjalna skala zasorbowanych zanieczyszczeń w biomasie jest duża, szczególnie w przypadku substancji organicznych. Duże niebezpieczeństwo niesie za sobą fakt, iż mieszkańcy użytkują zanieczyszczone wody podziemne w celach ogrodniczych, do mycia i/lub nawadniania upraw. Wszelkie przesłanki muszą być jednak potwierdzone szczegółowymi badaniami z zakresu rolnictwa, ichtiologii, leśnictwa i technologii spożywczej.

11. OCENA SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA DOTYCHCZAS WYKONANYCH INSTALACJI OGRANICZAJĄCYCH ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ W ŚRODOWISKU GRUNTOWO – WODNYM

Analiza skuteczności dotychczas stosowanych systemów i instalacji zmierzających do zatrzymania lub ograniczenia emisji zanieczyszczeń ze składowiska odpadów „Zielona” jest bardzo utrudnione z uwagi na niedostatki w danych. Wynika on z jednej strony z bardzo małego zakresu badań monitoringowych realizowanych w ramach eksploatacji ujęcia barierowego i ścianki szczelnej, z drugiej zaś niedotrzymywania tego obowiązku.

Dane dotyczące ilości zanieczyszczonych wód podziemnych odprowadzanych z wykorzystaniem ujęcia barierowego udało się pozyskać tylko dla okresu 2000-2014. Eksploatacja ujęcia była w tym czasie prowadzona tylko w studniach A₁ oraz C, a ilość odpompowywanych wód zmniejszała się od początkowych około 85-95 tys. m³/rok (w latach 2000-2001) do około 50-70 tys. m³/rok (w latach 2002-2009) a następnie od 2010 r., poniżej 50 tys. m³/rok, aż do zatrzymania ujęcia po 2014 r. Zasadniczo już w 2011 r. zaznacza się okres, gdzie ujęcie jest eksploatowane niezgodnie z przyjętymi założeniami, gdyż wyłączona zostaje studnia A₁. W 2012 r. ilość odpompowanej wody wyniosła tylko około 30 tys. m³/rok, zaś w kolejnym roku (2013 r.) ujęcie w ogóle nie było eksploatowane. Uruchomiono je jeszcze w 2014 r. z bardzo niewielką wydajnością i odpompowano tylko około 10 tys. m³ wody ze studni C (Rys. 22).



Rys. 22. Ilości zanieczyszczonych wód podziemnych odpompowanych z poszczególnych studni ujęcia barierowego w latach 2000-2014

W kolejnych latach, w związku z likwidacją Zakładów Chemicznych „Zachem” i wygaśnięciem pozwolenia wodno-prawnego na eksploatację ujęcia barierowego jego działalność została zawieszona, a stan ten trwa do chwili obecnej. Jednocześnie w poszczególnych studniach ujęcia dokonano demontażu agregatów pompowych, rurociągów odprowadzających wodę oraz zasilania

w energię elektryczną. Studnie i piezometry narażone na niczym nieograniczony dostęp osób nieupoważnionych, ulegają postępującej dewastacji i trudno jest obecnie wyrokować co do ich stanu technicznego i ewentualnej przyszłej przydatności.

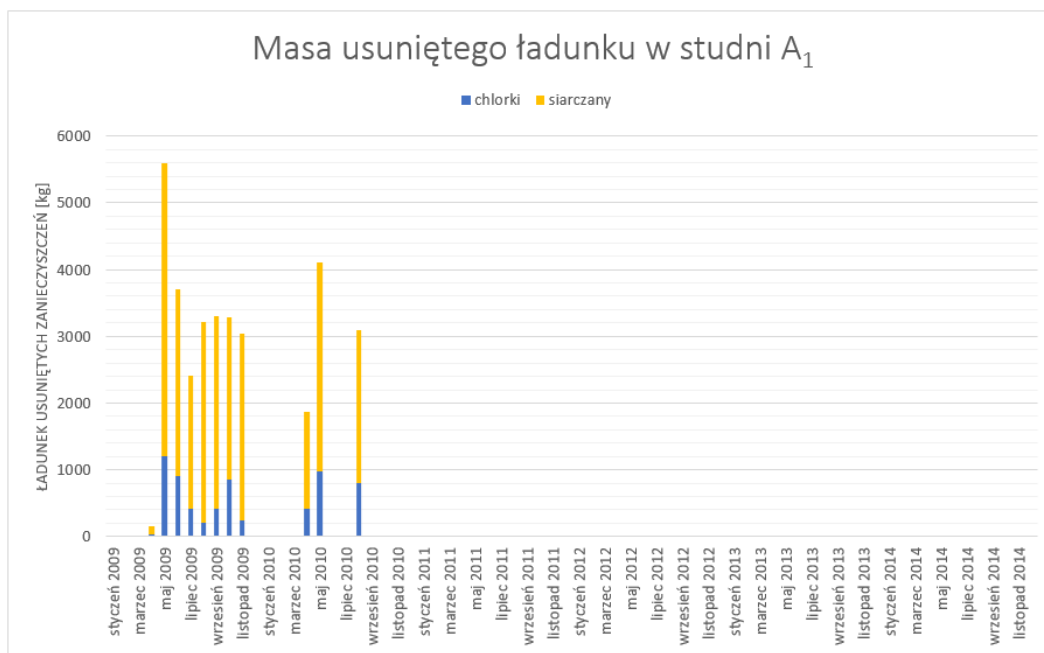
Głównym mankamentem w eksploatacji ujęcia barierowego było prowadzenie odpompowywania wód od początku kwietnia do końca listopada, z przerwą na sezon zimowy. Takim sposobem w okresie łącznie 4 miesiące (od początku grudnia do końca marca) zanieczyszczenia, których migracja ulegała intensyfikacji w związku z funkcjonowaniem ujęcia, miały pełną możliwość przemieszczania się w kierunku terasy Wisły.

Kolejnym mankamentem w pracy ujęcia barierowego było sukcesywne ograniczanie ilości odpompowywanych wód aż do poziomu rzędu około 1/3 początkowej wartości (tj. poniżej 40-50 tys. m³) i wyłączenie studni B oraz A₁. W takich warunkach bowiem nie było możliwe przejście całego strumienia zanieczyszczonych wód, które mogły swobodnie przemieszczać się w kierunku terasy Wisły.

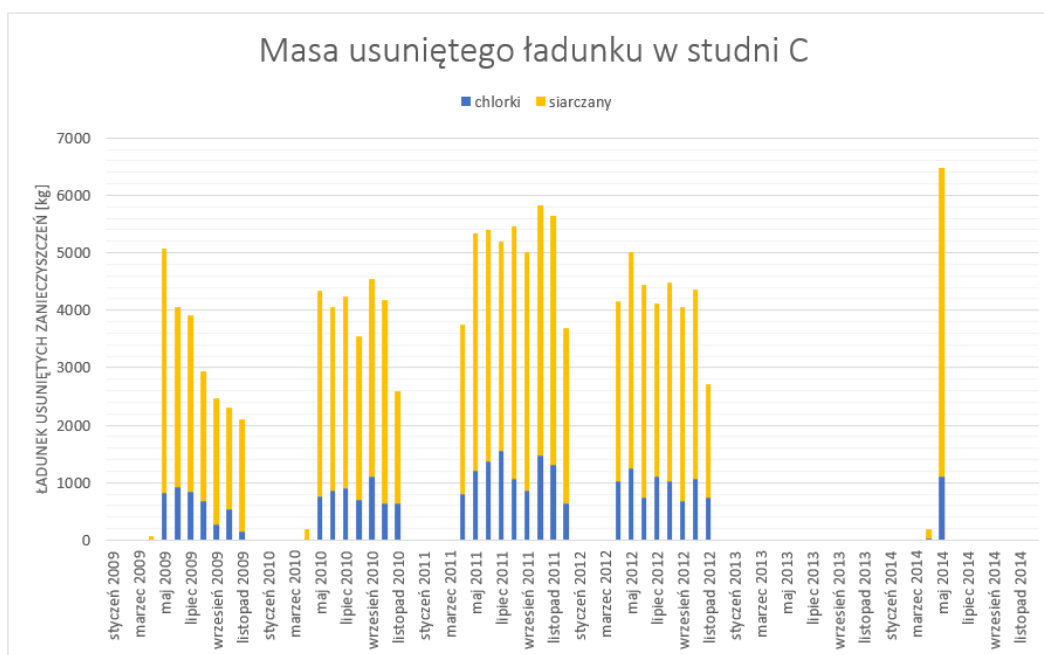
Dla okresu funkcjonowania ujęcia barierowego w latach 2009-2014 dostępne są również wyniki badań składu chemicznego odprowadzanych za jego pośrednictwem zanieczyszczonych wód podziemnych. Badania te charakteryzują się niską częstotliwością oraz bardzo dużym rozrzutem wyników i zasadniczo nie pozwalają na wiarygodną ocenę skuteczności funkcjonowania bariery przechwytyjącej chmurę zanieczyszczeń ze składowiska odpadów „Zielona”. W ogóle bowiem w ramach eksploatacji bariery nie rozważano problemu jej skuteczności pod kątem ładunku zanieczyszczeń koniecznego, czy też zakładanego do docelowego usunięcia ze środowiska gruntowo-wodnego. Należy też zwrócić uwagę, że w latach 2009-2014 praktycznie następowało wygaszanie aktywności ujęcia barierowego, gdzie jego wydajność spadła do poziomu poniżej 1/3 pierwotnie założonej wydajności (tj. do około 40-50 tys. m³/rok w stosunku do początkowych około 115 tys. m³/rok).

Główne znaczenie w zakresie redukcji ładunku zanieczyszczeń obecnych w środowisku, wynikający z gorszych parametrów jakościowych ujmowanych wód oraz dłuższego czasu eksploatacji, miała studnia C. Średni ładunek zanieczyszczeń usuwanych ze środowiska z odpompowanymi z niego wodami wynosił w granicach 2,5-6,0 tys. kg/miesiąc. Największe wartości pod względem ładunku zanieczyszczeń przyjmowała suma chlorków i siarczanów (Cl+SO₄), gdzie fenole i rozpuszczony węgiel organiczny stanowiły odpowiednio około 100–250 kg/miesiąc oraz 200–600 kg/miesiąc (Rys. 23, 24).

Średni ładunek zanieczyszczeń usuwanych ze środowiska z odpompowanymi z niego wodami wynosił dla studni A₁ około 2-4 tys. kg/miesiąc, przy czym główne znaczenie w tym względzie miała suma chlorków i siarczanów (Cl+SO₄). Ładunek usuwanych ze środowiska gruntowo-wodnego substancji organicznych, wyrażanych w postaci fenoli oraz rozpuszczonego węgla organicznego był zdecydowanie mniejszy i wynosił najczęściej od kilkudziesięciu do około 100 kg/miesiąc (Rys. 25, 26). Należy przy tym zwrócić uwagę, że badania jakościowe w studni A₁ zostały wykonane tylko w latach 2009-2010.



Rys. 23. Masa usuniętego ładunku substancji nieorganicznych ze studni A₁ ujęcia barierowego

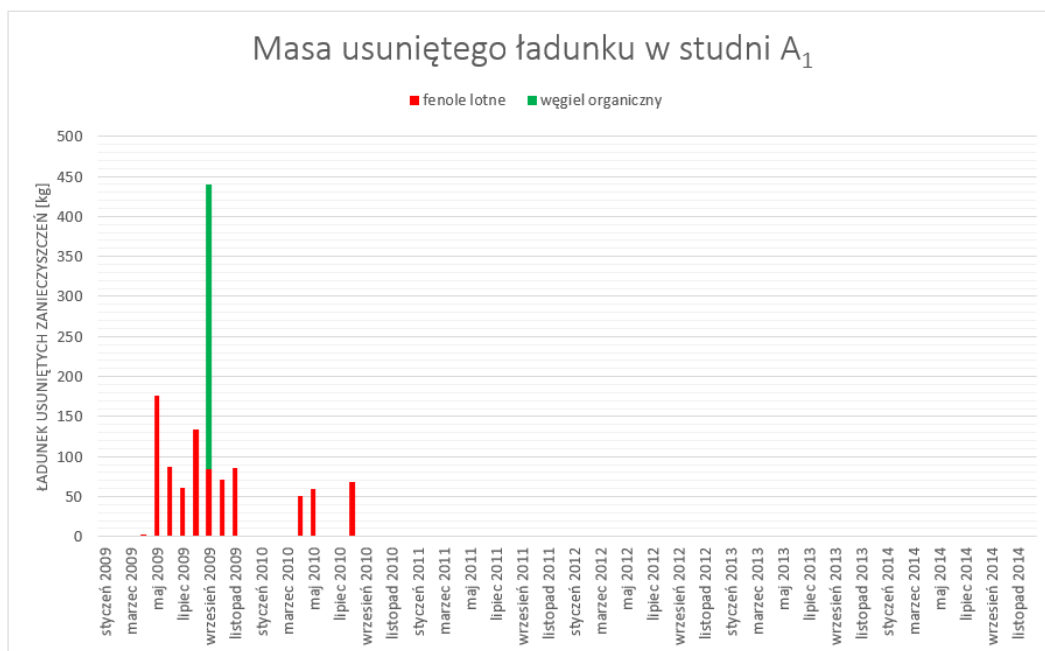


Rys. 24. Masa usuniętego ładunku substancji nieorganicznych ze studni C ujęcia barierowego

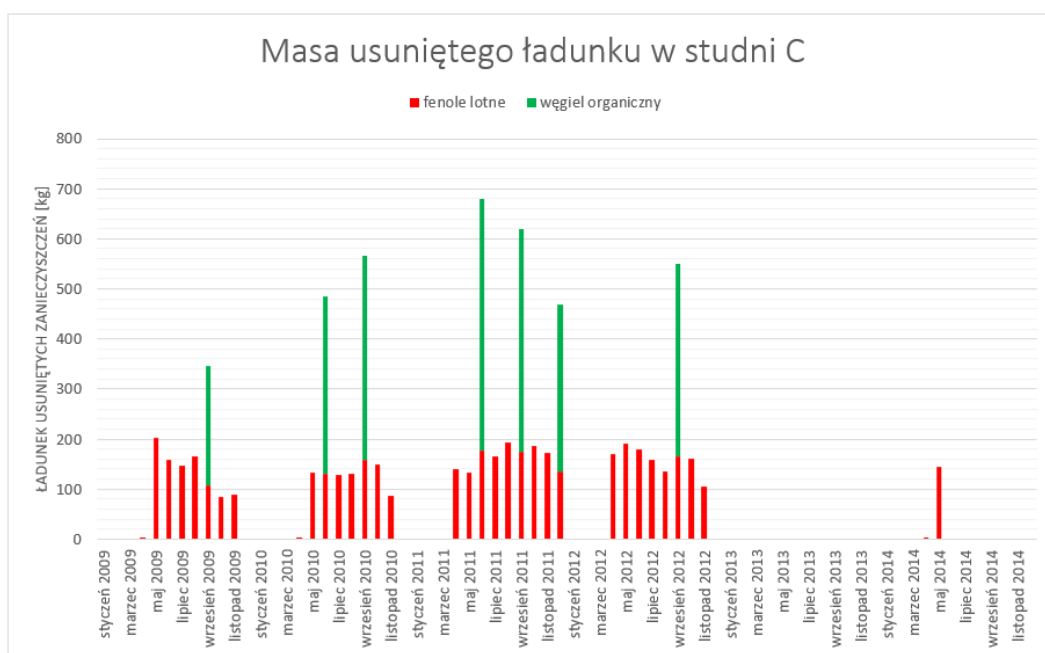
Ładunki zanieczyszczeń przechwytywane przez system bariery studni ujęciowych w latach 2009-2014 w odniesieniu do najbardziej szkodliwych substancji organicznych, należy uznać za bardzo małe, gdyż w warunkach 8-miesięcznej eksploatacji nie przekraczały one kilku tysięcy kilogramów.

Należy zwrócić uwagę, że w świetle oszacowań dokonanych na bazie szczegółowego opróbowania środowiska gruntowo-wodnego oraz zaawansowanego modelowania numerycznego, ładunek zanieczyszczeń zgromadzonych w obrębie tylko chmury zanieczyszczonych wód podziemnych

migrujących ze składowiska odpadów „Zielona” wynosi: 15 tys. chlorków (Cl), 5,75 tys. ton siarczanów (SO₄), 1,9 tys. ton substancji organicznych oraz 0,5 tys. ton fenolu.



Rys. 25. Masa usuniętego ładunku substancji organicznych ze studni A₁ ujęcia barierowego



Rys. 26. Masa usuniętego ładunku substancji organicznych ze studni C ujęcia barierowego

12. TECHNOLOGICZNE KONCEPCJE REMEDIACJI OBSZARU

12.1. Wariant 1

Wariant nr 1 koncepcji remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania, spełnia wymagania uwzględnienia całkowitego usunięcia źródła emisji zanieczyszczeń (zgodnie z §2 ust. 1 pkt. 3. umowy nr 1/ZP/2017).

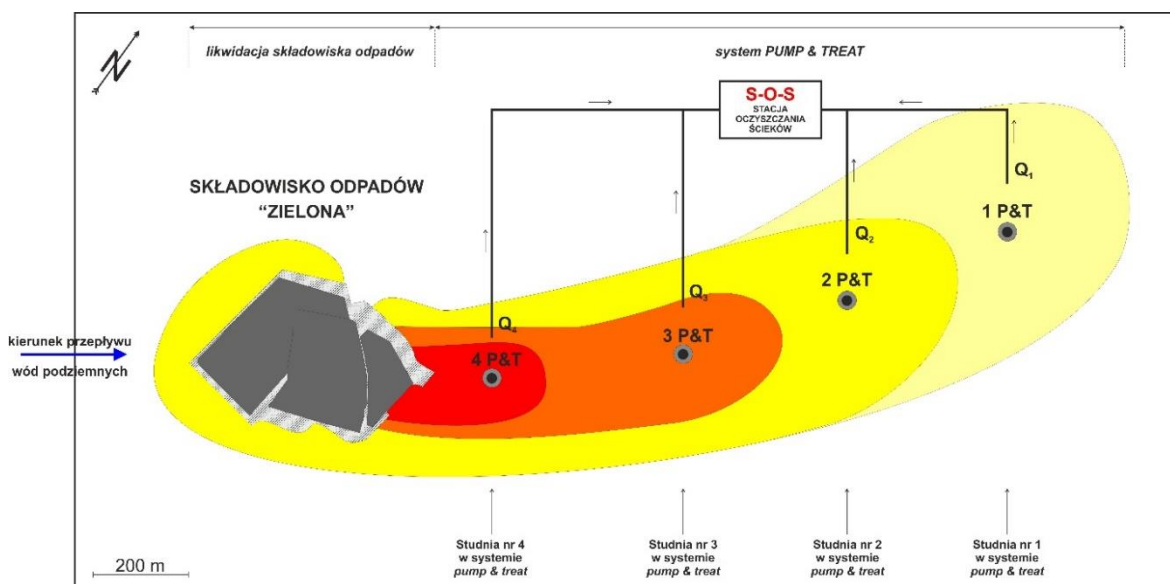
W wariantcie tym bryła odpadów przemysłowych zdeponowanych na składowisku „Zielona” na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy, która jest ciągle aktywnym ogniskiem zanieczyszczeń środowiska gruntowo-wodnego w założeniu ma zostać usunięta i skutecznie unieszkodliwiona (Rys. 27). Rozważane są w tym kontekście metody termicznego unieszkodliwiania w odpowiednio przystosowanych instalacjach do spalania odpadów komunalnych i sanitarnych, jak również w piecach cementowych. Usunięte i unieszkodliwione zostaną również zanieczyszczone grunty zalegające poniżej bryły odpadów, docelowo do głębokości około 3-3,5 m poniżej poziomu zwierciadła wód podziemnych.

Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” zajmuje powierzchnię około 11,3 ha, z czego Izolowane Składowisko Odpadów (ISO) – około 4,3 ha, zaś pozostały obszar – około 7 ha. Miąższość koniecznych do usunięcia odpadów i gruntów szacowana jest na około 7 m w obrębie ISO oraz około 10 m na pozostałym obszarze składowiska. Objętość koniecznych do usunięcia odpadów i zanieczyszczonych gruntów wynosi około 1001 tys. m³, z czego 662 tys. m³ zalega w strefie aeracji (tj. ponad poziomem zwierciadła wód podziemnych), natomiast 339 tys. m³ w warunkach zawodnienia (tj. w strefie poniżej zwierciadła wód podziemnych). Sumaryczna masa koniecznych do usunięcia odpadów i gruntów jest szacowana na astronomiczną wartość 2502,5 tys. ton. Ilość taka jest technicznie możliwa do przewiezienia do zakładu utylizacyjnego tylko transportem kolejowym.

Wyrobisko powstałe w miejscu wybranych odpadów i gruntów w kolejnym etapie remediacji będzie wypełniane materiałem obojętnym aż do jego wyrównania do poziomu pierwotnego terenu. Wymaga to wykorzystania około 1925 tys. ton naturalnych gruntów lub obojętnych materiałów odpadowych. Z uwagi na duże ilości mas ziemnych możliwe jest wypełnienie odkrywki tylko do poziomu około 1 m powyżej maksymalnego zalegania zwierciadła wód podziemnych. Ograniczy to ilość koniecznych do zastosowania materiałów wypełniających do poziomu 1237,5 tys. ton. Teren składowiska odpadów „Zielona” po zakończeniu wybierania odpadów oraz wypełniania materiałem obojętnym zostanie obsadzony roślinnością w celu przywrócenia mu dostępności i pełnych właściwości użytkowych.

Rekomendowana do zastosowania, dla potrzeb usunięcia chmury zanieczyszczonych wód podziemnych propagujących ze składowiska odpadów „Zielona”, jest technika „pump-and-treat” (TP&T). Polega ona na odpompowaniu zanieczyszczonej wody podziemnej, a następnie jej oczyszczeniu na powierzchni przed ponownym wtłoczeniem do warstwy wodonośnej bądź zrzutem do odbiorników powierzchniowych. Metoda ta jest stosowana w sytuacji, gdy stężenia substancji zanieczyszczających są bardzo wysokie i ma na celu odpompowanie z górotworu głównej masy zanieczyszczeń. Jest odpowiednia dla chmur, które objęły znaczne powierzchnie warstwy wodonośnej (nawet ponad 10 km²) do głębokości ponad 100 m. Metoda pump-and-treat może być wykorzystana zarówno w celu zapobiegania pogorszenia stanu środowiska, ale przede wszystkim dla

jego efektywnej poprawy. Żadna dostępna aktualnie technika nie jest tak wszechstronna i skuteczna (Holden i in., 1998). Jedną ze strategii użycia metody pump-and-treat jest oczyszczenie warstwy wodonośnej zgodnie z kierunkiem gradientu hydraulicznego (ang. *downgradient aquifer restoration*) oraz zatrzymanie propagacji chmury zanieczyszczeń (ang. *pluję cug-off*) (NRC 1994, Cherry i in. 1992, Cohen i in., 1997).

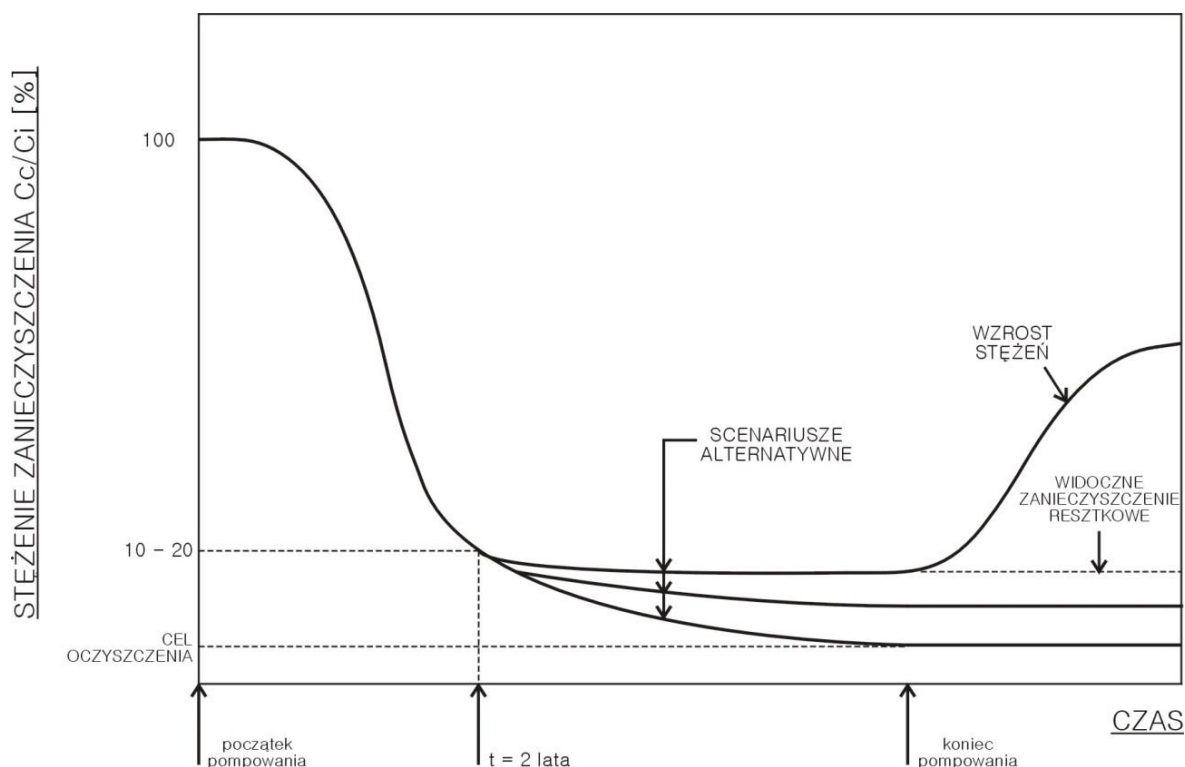


Rys. 27. Schemat wariantu nr 1 technologicznej koncepcji remediacji obszaru

Przykłady światowe (zebrane w Holden i in., 1998) wskazują, iż metoda pump-and-treat może prowadzić do skutecznej poprawy stanu środowiska gruntowo – wodnego tylko w warunkach likwidacji ogniska zanieczyszczenia. Jej samodzielne zastosowanie bez załatwienia problemu emisji zanieczyszczeń powoduje, że po wyłączeniu eksploatacji studni pompujących stężenie substancji zanieczyszczających ponownie rośnie, przy czym zazwyczaj do poziomu niższego niż obserwowane wartości początkowe (Rys. 28). Poziom jaki osiągają zanieczyszczenia jest tym niższy im większy jest ich ładunek usunięty ze środowiska.

W świetle wykonanych i zweryfikowanych badań modelowych obszar zanieczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego, związany z oddziaływaniem składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, zajmuje powierzchnię około 100 ha (w tym 86,25 ha chmury zanieczyszczeń oraz tzw. „strefa buforowa”). Przyjmując średnią miąższość warstwy wodonośnej na poziomie 7 m oraz współczynnik porowatości efektywnej $n_e = 0,25$, łączna objętość wód zanieczyszczonych w rejonie składowiska odpadów „Zielona” wynosi 1,75 mln m^3 . Z kolei objętość zanieczyszczonych gruntów jest znacznie większa i wynosi do 7,0 mln m^3 .

Chmura zanieczyszczonych wód podziemnych związana ze składowiskiem odpadów przemysłowych „Zielona” zostanie, w ramach planowanego wariantu 1, odpompowana jednocześnie 4 zestawami studni głębinowych (po około 2-3 studnie każdy), przy szacowanej wydajności każdego z zestawów w granicach do 75 m^3/h i depresji rzędu do 5 metrów. Przy założeniu sumarycznej wydajności systemu na średnim poziomie 300 m^3/h ilość wody odpompowanej w ciągu 1 roku wyniesie 2,628 mln m^3 , zaś w perspektywie 5 lat osiągnie poziom 13,14 mln m^3 (7,5-krotna wymiana wody w całym systemie).



Rys. 28. Typowy skutek metody pump-and-treat zanieczyszczonych wód podziemnych (Holden i in., 1998)

Legenda: C_c – aktualne stężenie zanieczyszczenia, C_i – stężenie początkowe zanieczyszczenia

Zanieczyszczone wody podziemne odprowadzane przez system TP&T, o parametrach ścieków przemysłowych, zostaną oczyszczone w dedykowanej oczyszczalni ścieków i odprowadzone do odbiorników powierzchniowych. Eksploatacja sytemu TP&T przez okres do około 5 lat zapewni skuteczne usunięcie chmury zanieczyszczeń i obniżenie stopnia degradacji środowiska gruntowo – wodnego do stanu akceptowalnego (Rys. 28).

W ramach prowadzenia prac remediacyjnych dla potrzeb bieżącej kontroli ich postępu oraz mając na uwadze możliwości ich dalszej optymalizacji, planuje się wykonanie sieci monitoringu środowiska gruntowo-wodnego. Będzie ona złożona z 5-6 piezometrów odwierconych w rejonie studni przechwytyjących zanieczyszczenia (średnia głębokość do 20 m, średnica 100-120 mm) z zamontowanymi czujnikami automatycznymi dla pomiaru ciśnienia oraz wybranych cech fizyko-chemicznych wód podziemnych. System monitoringu powinien zostać wykonany przed rozpoczęciem zasadniczej remediacji środowiska gruntowo-wodnego i pozostawiony po jego zakończeniu dla obserwacji naturalnych procesów samooczyszczania środowiska.

Wariant 1 jest działaniem związanym z dużą ilością koniecznych do zastosowania środków technicznych oraz uwzględniającym całkowite i jak najszybsze usunięcie zanieczyszczenia oraz minimalizację zagrożenia dla środowiska. Jest to również wariant najbardziej kosztowny.

12.2. Wariant 2

Wariant nr 2 koncepcji remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania spełnia wymagania uwzględnienia skutecznego unieszkodliwienia źródła emisji zanieczyszczeń (zgodnie z §2 ust. 1 pkt. 3. umowy nr 1/ZP/2017).

W proponowanym scenariuszu remediacyjnym stanowiącym wariant nr 2 składowisko odpadów „Zielona” zostanie ze wszystkich stron zabezpieczone przesłonami hydroizolacyjnymi (tzw. ściankami szczelnymi) dogłębnymi do utworów nieprzepuszczalnych, podścielających czwartorzędową warstwę wodonośną. Przesłony hydroizolacyjne zostaną zbudowane na długości ok. 2000 metrów i dogłębione do ok. 10 metrów p.p.t. (tj. około 1 m niżej w stosunku do średniej głębokości występowania utworów nieprzepuszczalnych w rejonie składowiska „Zielona”). Łączna powierzchnia koniecznej do wykonania przesłony hydroizolacyjnej, okonturowującej całe składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” wynosi 20,0 tys. m² (Rys. 29).

W kolejnym etapie unieszkodliwiania ogniska zanieczyszczeń cała powierzchnia składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” zostanie pokryta materiałem nieprzepuszczalnym uniemożliwiającym infiltrację opadów atmosferycznych, które są czynnikiem wymywającym substancje zanieczyszczające z bryły odpadów, a następnie przenoszą je do wód podziemnych. Uszczelnienie powierzchni składowiska jest standardową metodą mającą na celu skuteczne ograniczenie lub docelowo powstrzymanie aktywności ogniska zanieczyszczeń.

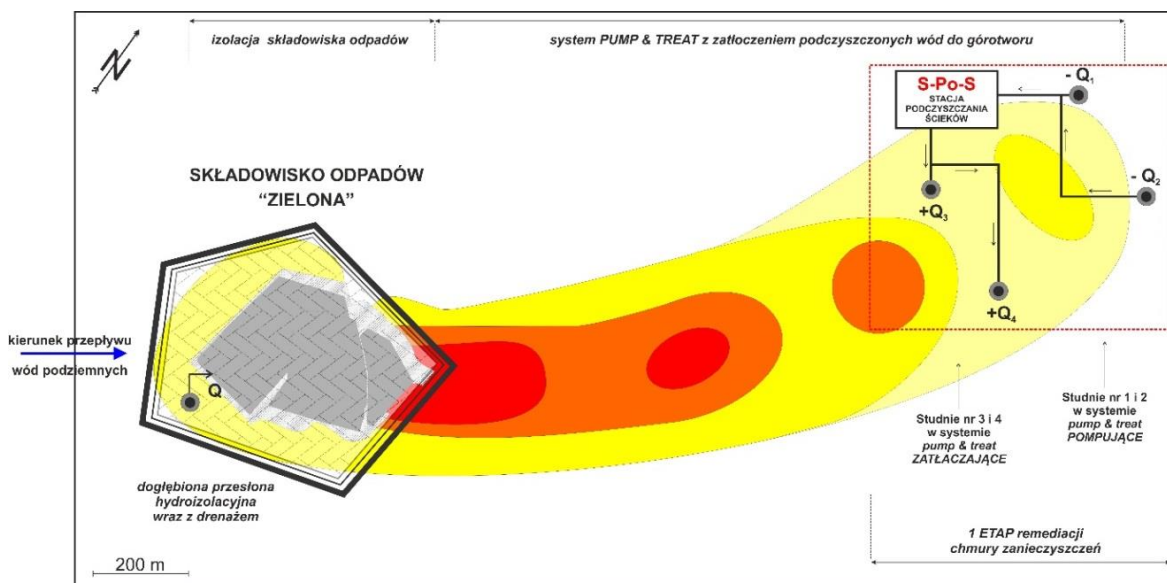
Powierzchnia jaką należy pokryć materiałem izolacyjnym wynosi ok. 18 ha (na którą składa się cały teren składowiska – 11,3 ha wraz z tzw. otuliną – 6,7 ha). W wariantcie nr 2 założono ponowne przykrycie całości składowiska warstwą izolacyjną, gdyż w świetle przeprowadzonych badań zastosowane w przeszłości na jego części geomembrany nie spełniają w pełni swojego zadania. Badania wilgotności bryły składowiska oraz gruntów i roztworów porowych w strefie aeracji stanowią dowody, że proces wymywania zanieczyszczeń zdeponowanych na składowisku zachodzi w dalszym ciągu.

Warstwa izolacyjna składowiska może zostać wykonana z wykorzystaniem sztucznych membran nieprzepuszczalnych jak również lokalnych utworów o niskiej przepuszczalności pionowej (Koot i in., 2011). Miąższość warstwy utworów o niskiej przepuszczalności powinna zostać dobrana w zależności od ich współczynnika filtracji w granicach 0,5–2,0 m. Dla wspomżenia sukcesji roślinnej zaleca się w miarę możliwości pokrycie izolacji składowiska humusem.

Wariant nr 2 w odniesieniu do bryły składowiska polega na zastosowaniu techniki sarkofagowania i stanowi skuteczny sposób unieszkodliwiania źródła emisji zanieczyszczeń. Wadą techniki jest pozostawienie odpadów w miejscu ich depozycji oraz stosunkowo wysokie koszty jej zastosowania, na które w największym stopniu składają się nakłady konieczne do poniesienia dla wykonania ścianek szczelnych.

Wewnątrz szczelnego sarkofagu powinny się znajdować co najmniej 2-3 otwory wiertnicze mające na celu stałą kontrolę poziomu zwierciadła wód w tej izolowanej strukturze oraz w miarę potrzeby umożliwiające odpompowanie ich nadmiaru. Średnica tych otworów w związku z ich

wielofunkcyjnością powinna wynosić około 200–300 mm. Z kolei w obrębie warstwy izolacyjnej przykrywającej bryłę składowanych odpadów powinien zostać wykonany system drenażu i monitoringu odcieków z bryły.



Rys. 29. Schemat wariantu nr 2 technologicznej koncepcji remediacji obszaru

Chmura zanieczyszczeń w ramach wariantu nr 2 zostanie poddana remediacji techniką pump-and-treat (TP&T) zmodyfikowaną w celu ograniczenia nakładów finansowych. Odpompowanie chmury następować będzie etapowo dla autonomicznych paneli złożonych ze studni pompujących, jednostki podczyszczającej i studni zatłaczających. Pierwszy panel zlokalizowany będzie na aktualnym froncie strefy zanieczyszczonej, gdzie studnie pompowe (do 2-3 szt.) będą eksploatowane z wydajnością sumaryczną do około $50 \div 100 \text{ m}^3/\text{h}$, przy założeniu minimalnej depresji na poziomie tylko około 0,5-1 m. Po podczyszczeniu wód (niecałkowitej redukcji zanieczyszczeń (!)) zostaną one zatłoczone z powrotem do warstwy wodonośnej za pomocą studni iniekcyjnych (2-3 szt.) zlokalizowanych w odległości około $300 \div 400 \text{ m}$ w kierunku składowiska „Zielona” (Rys. 29). Redukcja zanieczyszczeń przed ponownym zatłoczeniem odbywać się będzie na najwyższym możliwym do osiągnięcia technologicznie poziomie, tak aby w konsekwencji prac remediacyjnych osiągnąć ostatecznie osiągnąć 3 klasę jakości wód podziemnych, tj. poziom stężeń zanieczyszczeń wskaźnikowych koniecznych do uzyskania w ramach remediacji (podrozdział 16.2).

Technika remediacji uwzględniająca ponowne zatłoczenie podczyszczonych wód podziemnych zapewnia nie tylko skuteczne, sukcesywne oczyszczanie środowiska gruntowo – wodnego wraz z wymywaniem zanieczyszczeń zasorbowanych na gruncie (fazie stałej), ale stanowi również barierę hydrodynamiczną, która skutecznie zatrzymuje lub ogranicza dalszą propagację chmury zanieczyszczeń. Główną zaletą techniki jest zmniejszenie kosztów eksploatacji stacji podczyszczania wód wynikające z faktu niecałkowitej redukcji zanieczyszczeń.

Czas eksploatacji panelu studni remediacyjnych zależeć będzie od postępu w zakresie oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego i jest wstępnie szacowany na około 5 lat. W tym okresie zostanie odpompowane i ponownie zatłoczone do warstwy wodonośnej w granicach $3,285 \text{ mln m}^3$ wód podziemnych. Po oczyszczeniu pierwszego fragmentu chmury, tj. osiągnięciu celów remediacyjnych,

studnie iniekcyjne zostaną przekształcone w studnie pompowe, a w odległości kolejnych 200 ÷ 300 m na zachód od nich wywiercone zostaną nowe studnie iniekcyjne. Eksploatacja panelu nr 2 przebiegać będzie aż do oczyszczenia kolejnego fragmentu chmury zanieczyszczeń po czym nastąpi jego przekształcenie w kolejne panele nr 3 i 4, zbliżające się sukcesywnie do ogniska zanieczyszczeń. Parametry kolejnych paneli remediacyjnych proponowane są do przyjęcia jak dla opisanego powyżej panelu pierwszego.

Sumarycznie przewiduje się eksploatację systemu remediacji chmury zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych w rejonie składowiska w okresie do około 20 lat, co skutkować będzie odpompowaniem i podczyszczeniem, a następnie zatłoczeniem do górotworu około 13,14 mln m³ wód. Ilość ta jest blisko 7,5-krotnie wyższa od objętości zanieczyszczonych wód podziemnych w obrębie aktualnego zasięgu strefy zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych związanych ze składowiskiem odpadów przemysłowych „Zielona”.

W ramach prowadzenia prac remediacyjnych dla potrzeb bieżącej kontroli ich postępu oraz mając na uwadze możliwości ich dalszej optymalizacji planuje się wykonanie sieci monitoringu środowiska gruntowo-wodnego. Będzie ona złożona z 5-6 piezometrów odwierconych w rejonie studni przechwytyjących zanieczyszczenia (średnia głębokość do 20 m, średnica 100-120 mm) z zamontowanymi czujnikami automatycznymi dla pomiaru ciśnienia oraz wybranych cech fizyko-chemicznych wód podziemnych. System monitoringu powinien zostać wykonany przed rozpoczęciem zasadniczej remediacji środowiska gruntowo-wodnego i pozostawiony po jego zakończeniu dla obserwacji naturalnych procesów samooczyszczania środowiska.

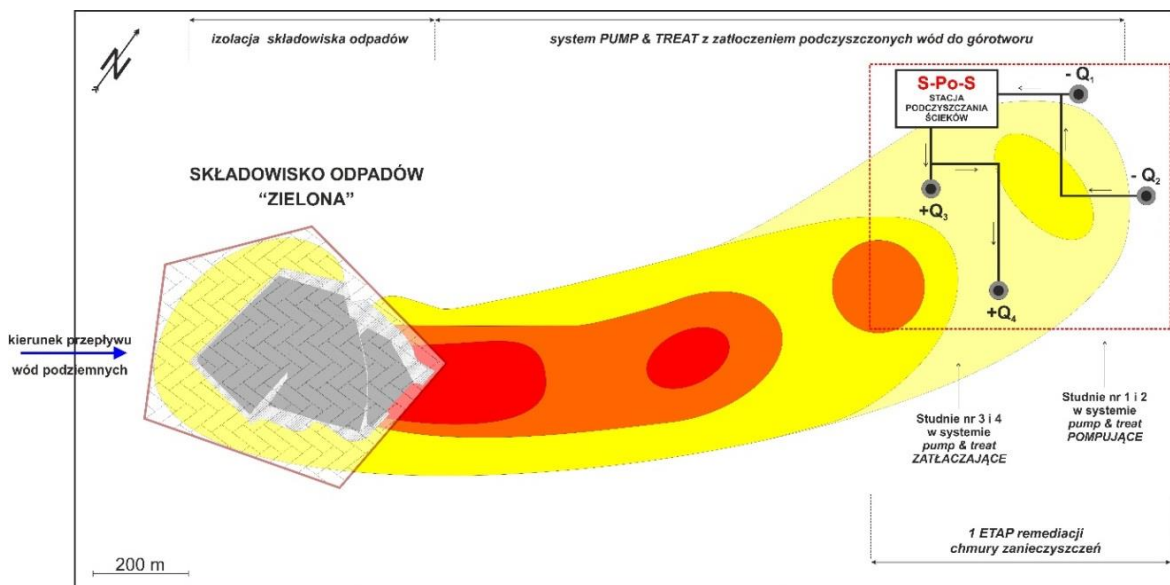
12.3. Wariant 3

Wariant nr 3 koncepcji remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania spełnia wymagania uwzględnienia skutecznego unieszkodliwienia źródła emisji zanieczyszczeń (zgodnie z §2 ust. 1 pkt. 3. umowy nr 1/ZP/2017).

Wariant nr 3 technologicznych koncepcji remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” zakłada usunięcie najbardziej niebezpiecznych i charakteryzujących się dużą wilgotnością osadów zdeponowanych na części ISO składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” i ich skuteczne unieszkodliwienie, a następnie wykonanie podstawowej rekultywacji terenu. Objętość koniecznych do usunięcia osadów wynosi około 86 tys. m³, zaś ich masa szacowana jest na około 150 tys. ton. W kolejnym etapie nastąpi przykrycie bryły składowiska warstwą utworów nieprzepuszczalnych lub sztuczną membraną izolacyjną identycznie jak w wariantcie nr 2 na powierzchni ok. 18 ha. Nie zostaną jednak wykonane kosztowne pionowe przesłony hydroizolacyjne (ścianki szczelne). Na podstawie wstępnych obliczeń analitycznych wydaje się, że odcięcie możliwości wnikania wód opadowych do bryły składowanych odpadów skutecznie zatrzyma proces wymywania zanieczyszczeń do wód podziemnych (Rys. 30). Zanieczyszczenia już wymyte nie zostaną natychmiast zatrzymane tak jak w wariantcie nr 2, ale zakłada się ich odpompowanie w ostatnim etapie remediacji chmury zanieczyszczeń.

Remediacja chmury zanieczyszczonych wód podziemnych przebiegać będzie etapowo dokładnie w sposób opisany w wariantcie 2. Odpompowanie chmury następować będzie dla kolejnych paneli

złożonych ze studni pompujących, jednostki podczyszczającej i studni zatłaczających. Pierwszy panel zlokalizowany będzie na froncie chmury zanieczyszczeń, gdzie studnie pompowe (do 2-3 szt.) będą eksploatowane z wydajnością sumaryczną do około $50 \div 100 \text{ m}^3/\text{h}$, przy założeniu minimalnej depresji na poziomie tylko około 0,5-1 m. Po podczyszczeniu wód zostaną one zatłoczone z powrotem do warstwy wodonośnej za pomocą studni iniekcyjnych, zlokalizowanych w odległości około $200 \div 300 \text{ m}$ w kierunku składowiska „Zielona”. Zgodnie z wykonanymi symulacjami, całkowita likwidacja chmury zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wymaga wykonania co najmniej 4 niezależnych paneli studni remediacyjnych, sukcesywnie zbliżających się do ogniska zanieczyszczeń.



Rys. 30. Schemat wariantu nr 3 technologicznej koncepcji remediacji obszaru

Czas eksploatacji panelu studni remediacyjnych w wariantcie nr 3 będzie identyczny jak opisany wcześniej dla wariantu nr 2 i zależeć będzie od postępu w zakresie oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego i jest wstępnie szacowany na około 5 lat. W tym okresie zostanie odpompowane i ponownie zatłoczone do warstwy wodonośnej w granicach $3,285 \text{ mln m}^3$ wód podziemnych. Eksploatacja systemu remediacji chmury zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” przewidywana jest na okres do około 20 lat, co skutkować będzie odpompowaniem i podczyszczeniem, a następnie zatłoczeniem do górotworu około $13,14 \text{ mln m}^3$ wód. Ilość ta jest blisko 7,5-krotnie wyższa od objętości zanieczyszczonych wód podziemnych w obrębie aktualnego zasięgu strefy zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych, związanych ze składowiskiem odpadów przemysłowych „Zielona”.

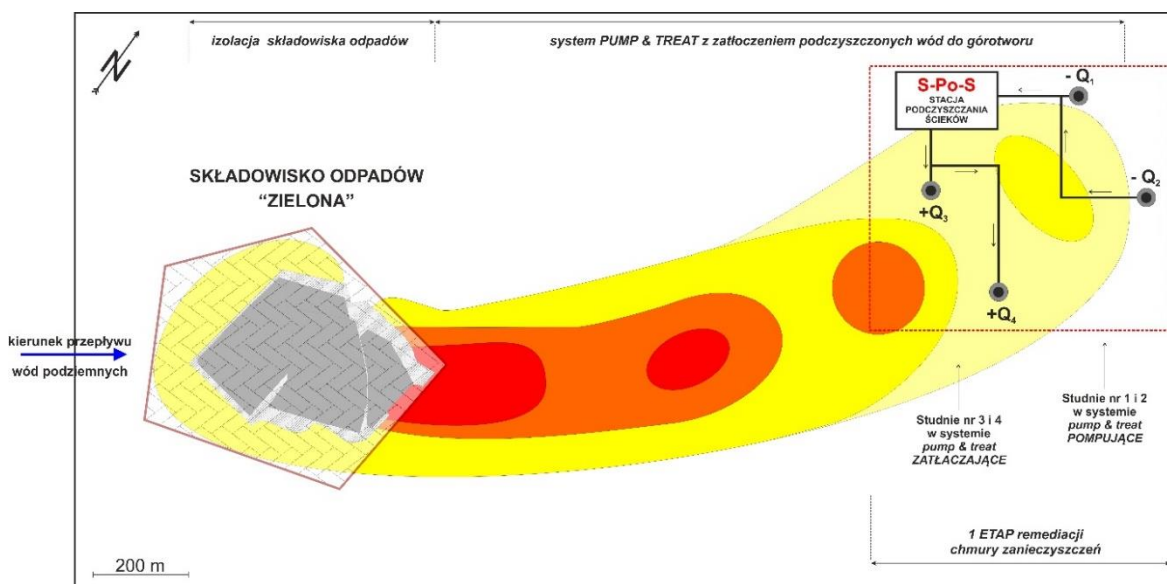
W ramach prowadzenia prac remediacyjnych dla potrzeb bieżącej kontroli ich postępu oraz mając na uwadze możliwości ich dalszej optymalizacji, planuje się wykonanie sieci monitoringu środowiska gruntowo-wodnego. Będzie ona złożona z 5-6 piezometrów odwierconych w rejonie studni przechwytyjących zanieczyszczenia (średnia głębokość do 20 m, średnica 100-120 mm) z zamontowanymi czujnikami automatycznymi dla pomiaru ciśnienia oraz wybranych cech fizyko-chemicznych wód podziemnych. System monitoringu powinien zostać wykonany przed rozpoczęciem zasadniczej remediacji środowiska gruntowo-wodnego i pozostawiony po jego zakończeniu dla obserwacji naturalnych procesów samooczyszczania środowiska.

12.4. Wariant 4

Wariant nr 4 koncepcji remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania spełnia wymagania uwzględnienia skutecznego unieszkodliwienia źródła emisji zanieczyszczeń (zgodnie z §2 ust. 1 pkt. 3. umowy nr 1/ZP/2017).

Wariant nr 4 technologicznych koncepcji remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” zakłada jego przykrycie warstwą utworów nieprzepuszczalnych lub sztuczną membraną izolacyjną, identycznie jak w wariantach nr 2 i 3, na powierzchni ok. 18 ha. Nie zostaną jednak wykonane najbardziej kosztowne pionowe przesłony hydroizolacyjne (ścianki szczelne), podobnie jak w wariacie nr 3. Zanieczyszczenia już wymyte nie zostaną natychmiast zatrzymane tak jak w wariacie nr 2, ale zakłada się ich odpompowanie w ostatnim etapie remediacji chmury zanieczyszczeń.

Remediacja chmury zanieczyszczonych wód podziemnych przebiegać będzie etapowo dokładnie w sposób opisany w wariantach nr 2 i 3 (Rys. 32). Odpompowanie chmury następować będzie dla kolejnych paneli złożonych ze studni pompujących, jednostki podczyszczającej i studni zatłaczających. Pierwszy panel zlokalizowany będzie na froncie chmury zanieczyszczeń, gdzie studnie pompowe (do 2-3 szt.) będą eksploatowane z wydajnością sumaryczną do około $50 \div 100 \text{ m}^3/\text{h}$, przy założeniu minimalnej depresji na poziomie tylko około 0,5-1 m. Po podczyszczeniu wód zostaną one zatłoczone z powrotem do warstwy wodonośnej za pomocą studni iniekcyjnych, zlokalizowanych w odległości około $200 \div 300 \text{ m}$ w kierunku składowiska „Zielona”. Zgodnie z wykonanymi symulacjami całkowita likwidacja chmury zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wymaga wykonania co najmniej 4 niezależnych paneli studni remediacyjnych, sukcesywnie zbliżających się do ogniska zanieczyszczeń.



Rys. 31. Schemat wariantu nr 4 technologicznej koncepcji remediacji obszaru

Czas eksploatacji panelu studni remediacyjnych w wariacie nr 4 będzie identyczny jak opisany wcześniej dla wariantów nr 2 i 3 oraz zależeć będzie od postępu w zakresie oczyszczania środowiska

gruntowo-wodnego i jest wstępnie szacowany na około 5 lat. W tym okresie zostanie odpompowane i ponownie zatłoczone do warstwy wodonośnej w granicach 3,285 mln m³ wód podziemnych.

Eksploracja systemu remediacji chmury zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” przewidywana jest na czas trwania do około 20 lat, co skutkować będzie odpompowaniem i podczyszczaniem, a następnie zatłoczeniem do górotworu około 13,14 mln m³ wód. Ilość ta jest blisko 7,5-krotnie wyższa od objętości zanieczyszczonych wód podziemnych w obrębie aktualnego zasięgu strefy zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych związanych ze składowiskiem odpadów przemysłowych „Zielona”.

W ramach prowadzenia prac remediacyjnych dla potrzeb bieżącej kontroli ich postępu oraz mając na uwadze możliwości ich dalszej optymalizacji planuje się wykonanie sieci monitoringu środowiska gruntowo-wodnego. Będzie ona złożona z 5-6 piezometrów odwierconych w rejonie studni przechwytyjących zanieczyszczenia (średnia głębokość do 20 m, średnica 100-120 mm) z zamontowanymi czujnikami automatycznymi dla pomiaru ciśnienia oraz wybranych cech fizyko-chemicznych wód podziemnych. System monitoringu powinien zostać wykonany przed rozpoczęciem zasadniczej remediacji środowiska gruntowo-wodnego i pozostawiony po jego zakończeniu dla obserwacji naturalnych procesów samooczyszczania środowiska.

12.5. Techniki uzupełniające

Ostatni etap remediacji chmury w bezpośrednim sąsiedztwie ogniska zanieczyszczeń wymagał będzie dłuższego czasu i dokładnej kontroli dla skutecznego odpompowania zanieczyszczeń, które z pewnym opóźnieniem mogą emitować się z bryły odpadów przykrytych utworami nieprzepuszczalnymi. W szczególności dotyczy to usunięcia szlamu solankowego, zdeponowanego nielegalnie w kwietniu 2017 r. na składowisku „Zielona”. W związku z nieszczelnością składowiska w miejscu depozycji szlamu iniekcja ładunku chlorku sodu nastąpiła od razu, przy czym wdrożenie dodatkowych inwazyjnych metod oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego znacznie zwiększy koszt działań remediacyjnych. Zanieczyszczenia już wymyte nie zostaną zatem natychmiast zatrzymane, ale zakłada się ich odpompowanie w ostatnim etapie remediacji chmury zanieczyszczeń. Działanie takie jest uzasadnione ekonomicznie, natomiast ze środowiskowego punktu widzenia nie dojdzie do ponownego skażenia środowiska gruntowo-wodnego poniżej bryły składowiska, a chlorek sodu jest substancją nieorganiczną, która nie stanowi bezpośredniego zagrożenia dla życia i/lub zdrowia okolicznych mieszkańców.

W końcowym okresie stosowania inwazyjnych metod remediacyjnych środowiska naturalnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” proponuje się rozpoczęcie obserwacji procesów samooczyszczania pod kątem ich przebiegu w omawianym przypadku oraz oceny realnych możliwości dalszego polepszania stanu środowiska wodnego. Początkowe stężenie zanieczyszczeń dla stanu aktualnego jest zbyt wysokie, aby metody samooczyszczania (and. monitored natural attenuation) były skuteczne. Po odpompowaniu dominującej masy zanieczyszczeń metodą pump-and-treat oraz ograniczeniu infiltracji substancji ze składowiska stężenia zanieczyszczeń mogą spaść do poziomu odpowiedniego dla metod samooczyszczania. Łatwiejsze i mniej kosztowne jest bowiem usunięcie ze środowiska zanieczyszczeń przy wysokich stężeniach. Niskie wartości stężeń są trudniejsze do skutecznego obniżenia.

Metody samooczyszczania są powszechnie używane i opisywane w literaturze fachowej od lat 90. ubiegłego wieku, ze względu na niskie koszty poprawy stanu zanieczyszczenia wód podziemnych. Stosuje się je najczęściej w przypadku, kiedy zanieczyszczenie nie stanowi bezpośredniego zagrożenia dla zdrowia człowieka. Metoda ta jest wykorzystywana w kontekście szerokiego spektrum substancji zanieczyszczających, a w szczególności związków chloroorganicznych, benzenu, toluenu, etylobenzenu i ksylenu (BTEX) oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), a także fenoli i bifenyli oraz pestycydów i substancji nieorganicznych (Sara, 2003).

Metody samooczyszczania nie mogą stanowić poważnej alternatywy dla inwazyjnych metod remediacyjnych. Ich stosowanie może doprowadzić do oczyszczenia środowiska tylko w bardzo długiej perspektywie czasu, a dla obiektów jak składowisko odpadów „Zielona” nie daje widocznych efektów. Wdrożenie metod ma jednak sens w ostatnim okresie funkcjonowania aktywnej remediacji, gdzie przyczynia się do obniżenia poziomu zanieczyszczenia, już po zakończeniu spompowania głównej masy zanieczyszczeń. Elementem wspomagającym ocenę skuteczności procesów samooczyszczania jest znajomość reakcji kształtujących skład chemiczny wód podziemnych lub zachodzących w chmurze zanieczyszczeń. W przypadku niezadowolających rezultatów należy przyspieszyć rozpad substancji organicznych i nieorganicznych z wykorzystaniem wspomagania procesów samooczyszczania (and. enhanced monitored natural attenuation). Najlepsze efekty mogą zostać osiągnięte poprzez zainiekowanie do zanieczyszczonej warstwy wodonośnej bakterii metanogennych z klasy *Archaeobacteria* lub *Methanothermea*.

13. HARMONOGRAM FINANSOWO – CZASOWY WARIANTÓW REMEDIACJI

Aktywne działania remediacyjne, tj. pompowanie wód zanieczyszczonych i ich ponowne zatłaczanie do górotworu, wywiezienie i utylizacja odpadów, posadowienie pionowych przesłon hydroizolacyjnych czy przykrycie powierzchni składowiska utworami nieprzepuszczalnymi, wiążą się z koniecznością wykonania kosztownych elementów infrastruktury technicznej. Niemniej największy wpływ na ogólne koszty remediacji środowiska gruntowo-wodnego mają zazwyczaj nakłady konieczne do poniesienia na budowę i bieżącą eksploatację stacji do oczyszczania/podczyszczania zdegradowanych wód.

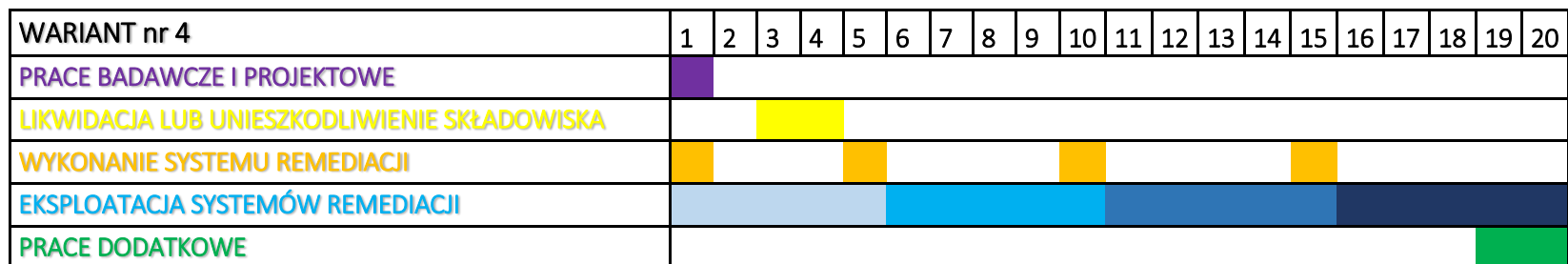
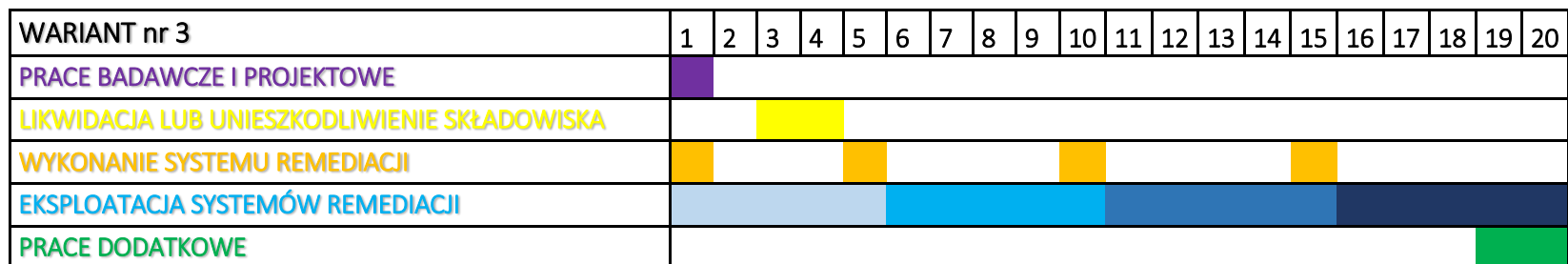
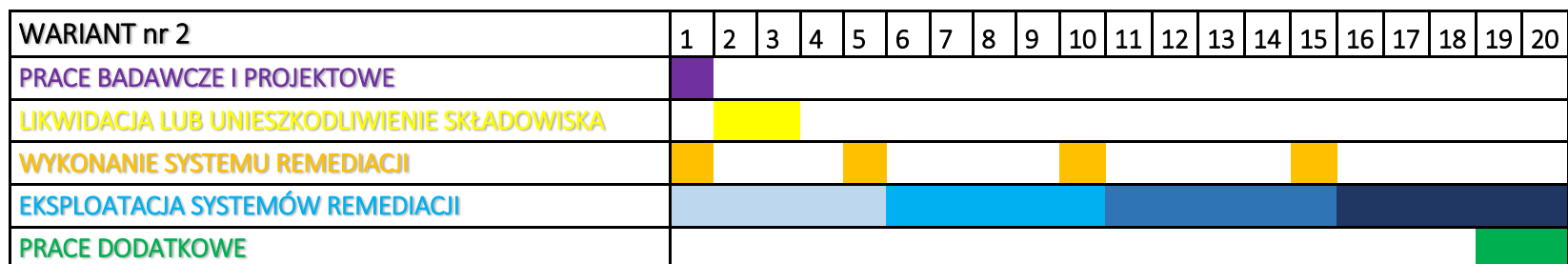
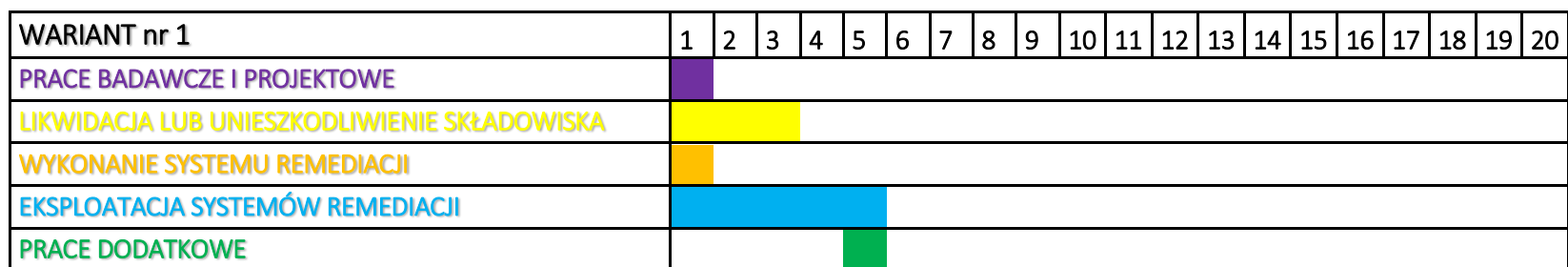
W kolejnej tabeli przedstawiono sumaryczne koszty realizacji poszczególnych wariantów remediacyjnych, w tym z uwzględnieniem podziału na prace badawcze i projektowe, prace remediacyjne (w tym likwidacja lub unieszkodliwienie składowiska odpadów oraz wykonanie systemu remediacji), a także bieżącą eksploatację systemu i prace dodatkowe (Tab. 7).

Z punktu widzenia finansowego, wariant nr 1 jest najbardziej niekorzystny (koszt blisko 2,6 mld zł). Warianty 2 i 3 są zasadniczo porównywalne ze sobą i odróżnia je istotnie koszt poniesiony na usunięcie i utylizację 150 tys. ton najbardziej niebezpiecznych odpadów oraz na wykonanie szczelnej, pionowej przesłony izolacyjnej wokół składowiska „Zielona”. Najmniej kosztowny okazał się wariant nr 4 i w związku z powyższym rekomenduje się jego realizację.

Pod względem czasu realizacji najkrótszy, tj. trwający 5 lat jest wariant nr 1, o ekstremalnie wysokich kosztach realizacji. Charakteryzuje się on dużą intensywnością prowadzonych prac i znacznym rozmiarem stosowanej infrastruktury technicznej. Warianty nr 2 do nr 4 są wprawdzie znacznie dłuższe, tj. zaplanowano je na 20 lat, ale zapewniają bardziej zrównoważone prowadzenie remediacji w bardziej bezpiecznych warunkach i przy mniejszym zaangażowaniu infrastruktury technicznej (Rys. 32).

Tab. 7. Porównanie kosztów na realizację poszczególnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [mln zł]

RODZAJ DZIAŁAŃ	WARIANT NR 1	WARIANT NR 2	WARIANT NR 3	WARIANT NR 4
Prace badawcze i projektowe	6,5	10,0	10,0	10,0
Likwidacja lub unieszkodliwienie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	1 060,4	91,3	126,75	58,5
Wykonanie systemu remediacji środowiska gruntowo-wodnego MP&T	108,0	35,0	35,0	35,0
Eksploatacja systemów remediacji MP&T	1 395,0	630,6	630,6	630,6
Prace dodatkowe	15,0	15,0	15,0	15,0
SUMA	2584,9	781,9	817,35	749,1



Rys. 32. Harmonogram czasowy realizacji poszczególnych wariantów remediacyjnych (w latach)

Szczegółowy wykaz elementów wpływających na przedstawione w tabeli koszty wariantów remediacyjnych został przedstawiony poniżej:

1. PRACE BADAWCZE

- a. badania stanu jakościowego gleb i gruntu (z uwzględnieniem strefy przemieszczenia chmury zanieczyszczeń poza granicę zakładu), koszt: 1,0 mln zł
- b. wykonanie systemu lokalnego monitoringu środowiska gruntowo-wodnego dla potrzeb planowanej remediacji (z wykorzystaniem istniejących piezometrów oraz do około 5-6 nowych otworów wraz z odpowiednimi czujnikami), koszt: 0,75 mln zł
- c. opróbowanie sieci monitoringowej (pobór próbek i analizy fizykochemiczne zgodnie z odpowiednimi założeniami metodycznymi, w kolejnych cyklach rocznych), koszt: 0,25 mln zł rocznie
- d. badania uwarunkowań dla emisji zanieczyszczeń ze składowiska odpadów „Zielona” (m.in. badania ilości zanieczyszczeń zgromadzonych na składowiskach, badanie szczelności warstw izolacyjnych, badanie gruntu w podłożu składowisk), koszt: 0,5 mln zł
- e. badania atmogeochemiczne powietrza glebowego i ewentualnych szkodliwych substancji lotnych w strefie aeracji gruntów oraz na obszarach chmur zanieczyszczeń wód podziemnych, koszt: 0,75 mln zł

KOSZT CAŁKOWITY: 3 mln zł + 0,25 mln rocznie

2. PRACE PROJEKTOWE

Zakres etapu został istotnie ograniczony w związku z dotychczasowymi badaniami i pracami projektowymi wykonanymi przez AGH, związane głównie z:

- a. uaktualnieniem badań modelowych w skali regionalnej i lokalnej,
- b. wykonaniem projektu technicznego systemu remediacyjnego (wszystkich elementów infrastruktury technicznej systemu).

KOSZT CAŁKOWITY: 2 mln zł

3. LIKWIDACJA LUB UNIESZKODLIWIENIE SKŁADOWISKA ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH „ZIELONA”

Wariant nr 1 Koszty realizacji wariantu z podziałem na poszczególne rodzaje działalności przedstawione zostały w tabeli (Tab. 8).

Tab. 8. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 1 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska

Lp.	Rodzaj działalności	Ilość [jednostka]	Cena jednostkowa [zł]	Wartość ogółem [zł]
1.	wydobycie odpadów i zanieczyszczonych gruntów	2 502 500 [t]	20	50 050 000
2.	transport odpadów do zakładu utylizacyjnego	2 502 500 [t]	75	187 687 500
3.	utylizacja odpadów przemysłowych (termiczna)	2 502 500 [t]	250	625 625 000
4.	transport materiału obojętnego i wypełnienie przestrzeni po wybranych odpadach i zanieczyszczonych gruntach	1 925 000 [t]	100	192 500 000
5.	rekultywacja terenu	18 [ha]	250 000	4 500 000

SUMA: 1 060 362 500

Wariant nr 2 Koszty realizacji wariantu z podziałem na poszczególne rodzaje działalności przedstawione zostały w tabeli (Tab. 9).

Tab. 9. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 2 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska

Lp.	Rodzaj działalności	Ilość [jednostka]	Cena jednostkowa [zł]	Wartość ogółem [zł]
1.	wykonanie konturu zamkniętego wokół składowiska z pionowych przesłon hydroizolacyjnych (ścianki szczelinowe)	20 000 [m ²]	2 500	50 000 000
2.	przykrycie składowiska warstwą izolacyjną	18 [ha]	2 000 000	36 000 000
3.	wykonanie otworów monitoringowych/drenażowych	3 [szt.]	250 000	750 000
4.	rekultywacja terenu	18 [ha]	250 000	4 500 000
			SUMA:	91 250 000

Wariant nr 3 Koszty realizacji wariantu z podziałem na poszczególne rodzaje działalności przedstawione zostały w tabeli (Tab. 10).

Tab. 10. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 3 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska

Lp.	Rodzaj działalności	Ilość [jednostka]	Cena jednostkowa [zł]	Wartość ogółem [zł]
1.	przykrycie składowiska warstwą izolacyjną o podwyższonych parametrach	18 [ha]	3 000 000	54 000 000
2.	wydobycie odpadów i zanieczyszczonych gruntów	150 000 [t]	30	4 500 000
3.	transport odpadów do zakładu utylizacyjnego	150 000 [t]	75	11 250 000
4.	utylizacja odpadów przemysłowych (termiczna)	150 000 [t]	250	37 500 000
5.	transport materiału obojętnego i wypełnienie przestrzeni po wybranych odpadach i zanieczyszczonych gruntach	150 000 [t]	100	15 000 000
6.	rekultywacja terenu	18 [ha]	250 000	4 500 000
			SUMA:	126 750 000

Wariant nr 4 Koszty realizacji wariantu z podziałem na poszczególne rodzaje działalności przedstawione zostały w tabeli (Tab. 11).

Tab. 11. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 4 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska

Lp.	Rodzaj działalności	Ilość [jednostka]	Cena jednostkowa [zł]	Wartość ogółem [zł]
1.	przykrycie składowiska warstwą izolacyjną o podwyższonych parametrach	18 [ha]	3 000 000	54 000 000
2.	rekultywacja terenu	18 [ha]	250 000	4 500 000
			SUMA:	58 500 000

4. WYKONANIE SYSTEMU REMEDIACJI ŚRODOWISKA GRUNTOWO-WODNEGO

Głównym czynnikiem wpływającym na koszt wykonania systemu remediacyjnego ma ilość koniecznych do odwiercenia studni (pompujących i iniekcyjnych), długości rurociągów do przepompowywania wód, a ponadto wydajność układu, która wpływa na wycenę kluczowej jednostki oczyszczania/podczyszczania wód (Tab. 12, 13).

Tab. 12. Wykaz elementów technicznych do realizacji w poszczególnych wariantach systemu remediacji środowiska gruntowo-wodnego

WSKAŹNIKI TECHNICZNE	WARIANT NR 1	WARIANT NR 2	WARIANT NR 3	WARIANT NR 4
Liczba studni [szt.]	12	15	15	15
Długość rurociągów [km]	4	5	5	5
Wydajność systemu [m ³ /h]	300	75	75	75

Tab. 13. Porównanie kosztów na realizację poszczególnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [zł]

WSKAŹNIKI TECHNICZNE	Cena jednostkowa [zł/jednostkę]	WARIANT NR 1	WARIANT NR 2	WARIANT NR 3	WARIANT NR 3
Wykonanie studni	500 000 zł/szt.	6 000 000	7 500 000	7 500 000	7 500 000
Wykonanie rurociągu	500 000 zł/km	2 000 000	2 500 000	2 500 000	2 500 000
Wykonanie stacji oczyszczania/ podczyszczania remediowanych wód	25 000 000 zł/szt. (Q _{max} 75 m ³ /h)	100 000 000	25 000 000	25 000 000	25 000 000
SUMA:		108 000 000	35 000 000	35 000 000	35 000 000

5. KOSZTY EKSPLOATACYJNE

Kategoria ta ma kluczowe znaczenie dla budżetu projektu remediacyjnego, w którym może stanowić nawet do 80% całkowitych nakładów finansowych. Dla potrzeb niniejszego opracowania koszty eksploatacyjne obliczono (Tab. 14) stosując następujące założenia:

- bieżąca obsługa instalacji, remonty, uzupełnienia (do około 10-15% sumy całkowitej),
- koszty oczyszczania wód z systemu remediacyjnego, do poziomu parametrów umożliwiających ich zrzut do wód powierzchniowych – cena jednostkowa 100 zł/m³,
- koszty tylko podczyszczania wód z systemu remediacyjnego, w celu ograniczenia ładunku zanieczyszczeń – cena jednostkowa 40 zł/m³ (średnia dla przedziału 30-50 zł/m³).

Tab. 14. Porównanie kosztów na realizację poszczególnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [zł]

WSKAŹNIKI TECHNICZNE	Cena jednostkowa [zł/jednostkę]	WARIANT NR 1	WARIANT NR 2	WARIANT NR 3	WARIANT NR 3
Obsługa. remonty. uzupełnienia	15% wartości instalacji	16 200 000	5 250 000	5 250 000	5 250 000
Oczyszczanie wody	100 zł/m ³	262 800 000	-	-	-
Podczyszczanie wody	40 zł/m ³	-	26 280 000	26 280 000	26 280 000
ROCZNE KOSZTY EKSPLOATACYJNE		279 000 000	31 530 000	31 530 000	31 530 000
CZAS TRWANIA REMEDIACJI [LATA]		5	20	20	20
CAŁKOWITE KOSZTY EKSPLOATACYJNE		1 395 000 000	630 600 000	630 600 000	630 600 000

6. KOSZTY DODATKOWE

W ramach tej kategorii uwzględniono:

- koszty dodatkowych zabiegów remediacyjnych (w tym technik „*in situ*”), dla uzyskania odpowiedniego stanu środowiska (doczyszczanie terenu i środowiska gruntowo-wodnego),
- koszty uporządkowania i urządzenia terenu, dodatkowych nasadzeń roślinności i in.,
- rezerwę na nieprzewidziane sytuacje, w tym awaryjne.

KOSZT CAŁKOWITY: 15 mln zł

14. KRYTERIA WYBORU I IDENTYFIKACJA OPTIMALNEGO SPOSOBU REMEDIACJI

Wybór optymalnego sposobu remediacji dla obszaru składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz ze strefą zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych występujących w obrębie chmury zanieczyszczeń jest bardzo trudnym i skomplikowanym zadaniem, dodatkowo obciążonym dużą odpowiedzialnością.

Pod względem teoretycznym wybór optymalnych sposobów remediacji środowiska wodno-gruntowego zazwyczaj opierają się na dwóch podstawowych założeniach:

1. Rekomendowana metoda musi stanowić rozwiązanie kompromisowe z punktu widzenia potrzeb społecznych i środowiskowych oraz możliwości ekonomicznych i technicznych,
2. Rekomendowana metoda powinna mieć najmniejszy wskaźnik kosztowności w stosunku do skuteczności. Przy czym za skuteczność metody przyjmuje się osiągnięcie poziomu oczyszczenia środowiska do stanu akceptowalnego założonego w projekcie z uwzględnieniem kryterium czasowego.

W celu zrównoważonej realizacji procesu remediacji należy oprócz ww. aspektów dokonać szczegółowej oceny krytycznych czynników indywidualnych dla każdego proponowanego wariantu. Czynniki, indywidualnie dostosowane dla potrzeb remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, umieszczono w tabeli poniżej (Tab. 15). Najważniejszymi elementami podlegającymi ocenie są w tym przypadku: skuteczność likwidacji zagrożeń środowiska, wielkość nakładów finansowych, w tym kosztów eksploatacyjnych oraz czas remediacji.

Tab. 15. Kryteria oceny punktowej w procedurze wyboru optymalnej metody remediacji

OCENA	CZYNNIKI KRYTYCZNE I KATEGORIE PUNKTOWE
	<u>SKUTECZNOŚĆ LIKWIDACJI ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA</u>
0	BRAK DZIAŁAŃ LUB DZIAŁANIA DORAŻNE
1	OGRANICZENIE PROPAGACJI LUB ZATRZYMANIE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ
2	OGRANICZENIE LUB ZATRZYMANIE EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ Z OGNISKA
3	OGRANICZENIE ŁADUNKU ZANIECZYSZCZEŃ W ŚRODOWISKU GRUNTOWO – WODNYM DO POZIOMU 50% WARTOŚCI POCZĄTKOWEJ
4	OGRANICZENIE ŁADUNKU ZANIECZYSZCZEŃ W ŚRODOWISKU GRUNTOWO – WODNYM DO POZIOMU 20-50% WARTOŚCI POCZĄTKOWEJ
5	OGRANICZENIE ŁADUNKU ZANIECZYSZCZEŃ W ŚRODOWISKU GRUNTOWO – WODNYM DO POZIOMU PONIŻEJ 20% WARTOŚCI POCZĄTKOWEJ
	<u>EFEKTYWNOŚĆ KOSZTOWA REMEDIACJI</u>
0	> 25 mln zł/ha
1	20 ÷ 25 mln zł/ha
2	15 ÷ 20 mln zł/ha
3	10 ÷ 15 mln zł/ha
4	5 ÷ 10 mln zł/ha
5	< 5 mln zł/ha

CZAS KONIECZNY DLA PRZEPROWADZENIA SKUTECZNEJ REMEDIACJI ŚRODOWISKA	
0	> 50 lat
1	25 ÷ 50
2	15 ÷ 25
3	10 ÷ 15
4	5 ÷ 10
5	< 5 lat

Ocena wariantu remediacyjnego jest dokonywana poprzez zsumowanie punktów przypadających na poszczególne kryteria. Sumaryczny wynik punktowy jest w zależności od swojej wartości decydujący dla możliwości zastosowania wariantów, zgodnie z klasyfikacją przedstawioną w kolejnej tabeli (Tab. 16). W przypadku identycznej oceny punktowej ocenianych wariantów, kryterium decydującym o ich realizacji stanowią niższe nakłady finansowe lub krótszy czas realizacji.

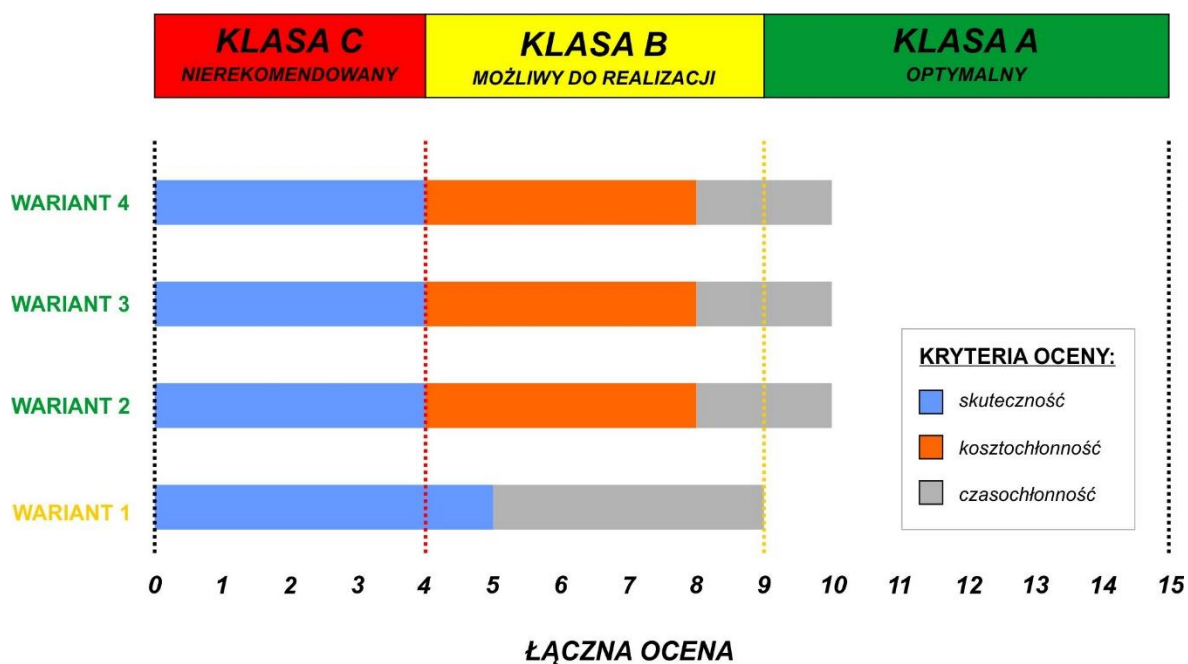
Tab. 16. Kategoryzacja wyników oceny wariantów remediacji środowiska gruntowo-wodnego

PRZEDZIAŁ PUNKTOWY	REKOMENDACJA DLA WARIANTU	KLASA ROZWIĄZANIA
≥ 10 pkt	Optimalny. rekomendowany do zastosowania	Klasa A
5 ÷ 9 pkt	Możliwy do zastosowania	Klasa B
< 5 pkt	Nierekomendowany	Klasa C

Wyboru optymalnego sposobu remediacji rejonu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z chmurą zanieczyszczonych wód podziemnych dokonano w oparciu o przedstawioną powyżej metodykę. Zestawienie ocen poszczególnych czynników krytycznych z podziałem na warianty technologiczne remediacji przedstawiono w tabeli poniżej (Tab. 17) oraz na diagramie (Rys. 33):

Tab. 17. Ocena wariantów koncepcyjnych remediacji rejonu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”

CZYNNIKI KRYTYCZNE	WARIANT 1	WARIANT 2	WARIANT 3	WARIANT 4
SKUTECZNOŚĆ LIKWIDACJI ZAGROŻEŃ ŚRODOWISKA	5	4	4	4
WIELKOŚĆ NAKŁADÓW FINANSOWYCH	0	4	4	4
CZAS REMEDIACJI	4	2	2	2
OCENA PUNKTOWA:	9	10	10	10



Rys. 33. Diagram identyfikacji optymalnego, rekomendowanego do zastosowania wariantu remediacji

Na podstawie przeprowadzonej oceny wariantów technologicznych zaproponowanych dla potrzeb remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz środowiska gruntowo-wodnego w strefie jego oddziaływania jako wariant optymalny, rekomendowany do realizacji wskazane zostały warianty nr 2, 3 i 4.

Wszystkie zaproponowane rozwiązania charakteryzują się wskaźnikiem oceny wg metodyki AGH na poziomie 10 pkt. (Klasa A), przy czym ich sumaryczne koszty są bardzo zbliżone i zawierają się w przedziale 749,1–817,35 mln zł. Kwota różnicy pomiędzy najtańszym i najdroższym spośród optymalnych wariantów remediacji wynosi 68,25 mln zł, co stanowi tylko niespełna 9% średnich kosztów obliczonych dla wariantów nr 2, 3 i 4. Różnica ta jest zatem niższa od przyjętej na 20% rezerwy nadmiarowej w oszacowywaniu kosztów poszczególnych wariantów remediacyjnych.

Należy podkreślić, że wszystkie spośród zaproponowanych rozwiązań, tj. warianty nr 2, 3 i 4 gwarantują usunięcie ze środowiska gruntowo-wodnego do 80% zanieczyszczeń oraz skuteczną likwidację zagrożeń środowiskowych i dla okolicznej ludności.

Dłuższy okres realizacji projektu remediacyjnego przewidziany dla wariantów nr 2, 3 i 4 (20 lat) pozwala obniżyć roczne nakłady finansowe na remediację do poziomu około 40 mln zł, gdzie decydujące znaczenie dla jego wartości mają koszty podczyszczania wód podziemnych (26,28 mln zł, tj. około 67%).

15.SZCZEGÓŁOWA CHARAKTERYSTYKA PROPONOWANEGO SPOSOBU REMEDIACJI

15.1. Główne cele remediacji

Opracowanie i zaprojektowanie optymalnego scenariusza remediacyjnego środowiska gruntowo – wodnego dla chmury zanieczyszczeń w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” możliwe jest wyłącznie w oparciu o rzeczywiste zrozumienie procesu migracji substancji chemicznych oraz ogółu przebiegających procesów hydrogeochemicznych. Najistotniejsze znaczenie dla procedury projektowania skutecznej remediacji ma określenie celu środowiskowego podejmowanych prac. Najogólniej związany jest on z poziomem oczyszczenia środowiska do np. stanu pierwotnego lub akceptowalnego (Todd i in. 2005). Należy zwrócić uwagę, że oczyszczenie środowiska do stanu pierwotnego jest bardzo trudne czy nawet wręcz niemożliwe i wymaga zaangażowanie często znacznych środków technicznych i finansowych. Jako wynik kompromisu, o wiele częściej prowadzi się oczyszczanie środowiska do poziomu akceptowalnego, przy czym najczęściej oznacza on występowanie stosunkowo niskich stężeń zanieczyszczeń charakterystycznych dla klas jakościowych opisujących stan zadowalający.

Zasadnicza remediacja środowiska gruntowo-wodnego mająca na celu poprawę stanu środowiska związana jest z usuwaniem zanieczyszczeń z warstwy wodonośnej z zastosowaniem techniki pump-and-treat, co docelowo prowadzi do zmniejszania się poziomu stężeń niepożądanych substancji chemicznych oraz ograniczenia rozmiaru obszarów zanieczyszczonych. Remediacja w typowych warunkach wymaga zazwyczaj istotnych nakładów finansowych, rzędu dziesiątek czy setek milionów złotych oraz czasu rzędu kilku – kilkunastu lat. Projektowanie remediacji środowiska gruntowo-wodnego, bardzo często obejmuje również działania doraźne związane z ograniczaniem lub skutecznym powstrzymaniem rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Sytuacja taka ma miejsce w szczególności w przypadkach, gdy migrująca chmura zanieczyszczeń stwarza realne zagrożenie zanieczyszczenia ujęć wód podziemnych oraz może mieć wpływ na pogorszenie jakości wód powierzchniowych.

Głównym celem remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” S.A. w Bydgoszczy oraz remediacji środowiska gruntowo-wodnego w obszarze oddziaływania tego składowiska jest osiągnięcie tzw. dobrego stanu chemicznego wód podziemnych, tj. parametrów granicznych dla III klasy jakościowej. Wody podziemne w tej klasie określić można jako wody o zadowalającej jakości, gdzie w warunkach naturalnych wartości wskaźników jakościowych są podwyższone w wyniku naturalnych procesów lub słabego oddziaływania antropogenicznego. Cel jakościowy w odniesieniu do wód podziemnych będzie zatem spełniał wszystkie wymagania stężeń substancji nieorganicznych i organicznych oraz parametrów fizykochemicznych zawartych w załączniku Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz.U. 2016 poz. 85).

W odniesieniu do poziomu stężeń substancji zanieczyszczających w obrębie gleb i gruntów, stanowiących niemobilny element środowiska gruntowo-wodnego jako cel remediacji przyjmuje się maksymalne wartości składników chemicznych dla grupy gruntów IV, podane w Rozporządzenia

Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U. 2016 poz. 1395). W przypadku braku tego typu wartości progowej jako cel remediacji gleb i gruntów przyjmuje się poziom substancji chemicznej nie powodujący ryzyka wystąpienia zagrożeń dla zdrowia ludzi i dla stanu środowiska.

15.2. Planowany sposób przeprowadzenia remediacji

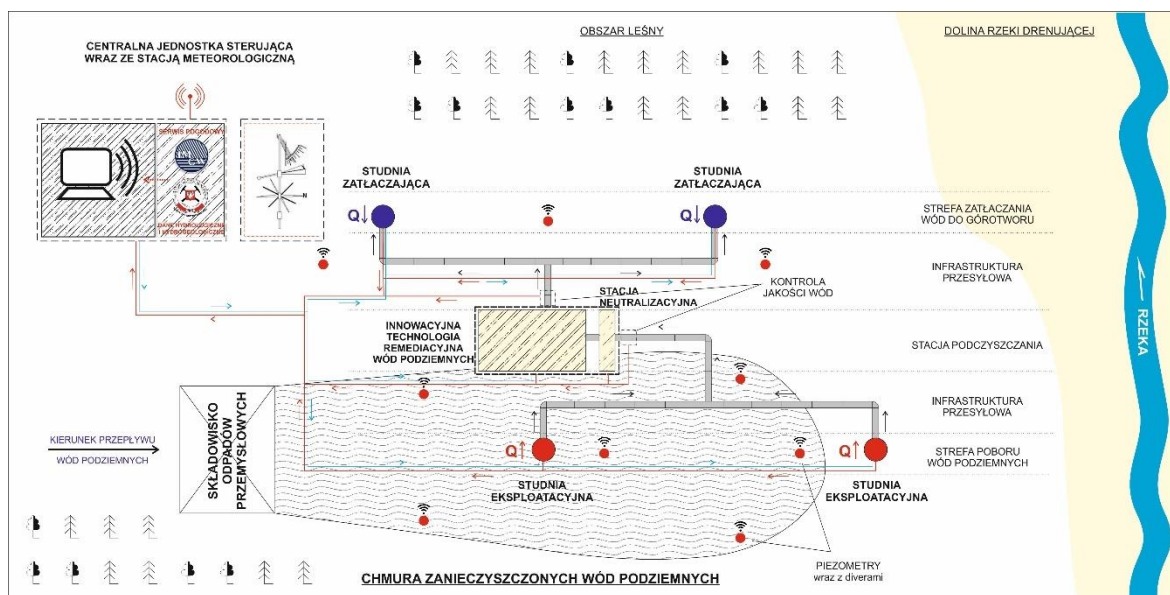
Generalny plan przeprowadzenia procesu remediacji polega na:

- 1) Odpompowaniu masy zanieczyszczonych wód podziemnych za pomocą studni przechwytyjących i po ich oczyszczeniu/podczyszczeniu na dedykowanej instalacji powrotne ich wtłoczenie do górotworu za pośrednictwem studni iniekcyjnych, w celu usunięcia zanieczyszczeń zasorbowanych na fazie niemobilnej tj. w obrębie gruntów budujących warstwę wodonośną. Proponowana do zastosowania dla rejonu składowiska odpadów „Zielona” technika remediacji nosi angielską nazwę „pump-and-treat” tj. w tłumaczeniu na język polski „pompuj i oczyszczaj”. W związku ze znacznym rozmiarem zanieczyszczonego środowiska gruntowo-wodnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, obejmującym obszar ponad 108,518 ha działania te prowadzone będą w kilku następujących po sobie etapach (panelach remediacyjnych), rozpoczynając od strefy frontu chmury zanieczyszczeń i sukcesywnie zbliżając się w kierunku ogniska zanieczyszczeń. Dla potrzeb powtarzalnych paneli remediacyjnych, każdorazowo wyznaczany będzie obszar remediacji oraz konfiguracja studni przechwytyjących i iniekcyjnych oraz otworów piezometrycznych, mających na celu monitorowanie bieżących efektów remediacji. Po osiągnięciu założonych celów remediacyjnych w odniesieniu do wszystkich elementów środowiska gruntowo-wodnego tj. fazy niemobilnej – gleb i gruntów jak i fazy mobilnej – wód podziemnych, następować będzie przejście do kolejnego etapu remediacji, skutkujące budową nowego panelu remediacyjnego, w miarę możliwości z jak największym wykorzystaniem już istniejącej infrastruktury technicznej.
- 2) Unieszkodliwieniu ogniska zanieczyszczeń tj. składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” w postaci skutecznego ograniczenia lub całkowitej likwidacji dalszych możliwości emisji zanieczyszczeń z masy zdeponowanych odpadów. Tak zdefiniowany cel jest praktycznie możliwy do osiągnięcia w warunkach realizacji budowy: (a) sarkofagu złożonego z wierzchniej warstwy izolacyjnej, przykrywającej składowisko oraz okonturowujących go pionowych przeston izolacyjnych o powierzchni terenu do nieprzepuszczalnego podłoża lub (b) zastosowania tylko wierzchniej warstwy nieprzepuszczalnej o podwyższonych parametrach izolacyjnych. Obliczenia analityczne wskazują, że odcięcie możliwości wnikania wód opadowych do bryły składowanych odpadów skutecznie zatrzyma proces wymywania zanieczyszczeń do wód podziemnych. Zanieczyszczenia już wymyte zostaną odpompowane w ostatnim etapie remediacji chmury zanieczyszczonych wód podziemnych. Z uwagi na bardzo wysokie koszty wywozu i unieszkodliwienia odpadów całkowita likwidacja ogniska zanieczyszczeń jest nierealna. Działania związane ze skutecznym unieszkodliwieniem składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” należy podjąć jak najszybciej, w tym optymalnie równoległe z prowadzoną eksploatacją pierwszego panelu studni przechwytyjących i iniekcyjnych dla oczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego.

- 3) W końcowym okresie remediacji środowiska gruntowo-wodnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” proponuje się rozpoczęcie obserwacji procesów samooczyszczania (ang. natural attenuation), pod kątem ich przebiegu w omawianym przypadku oraz oceny realnych możliwości dalszego samoczynnego polepszania stanu środowiska wodnego. Początkowe stężenia zanieczyszczeń dla stanu aktualnego są w przypadku chmury zanieczyszczeń ze składowiska „Zielona” zbyt wysokie, aby naturalne metody samooczyszczania (ang. monitored natural attenuation) mogły być skuteczne. Po odpompowaniu dominującej masy zanieczyszczeń metodą pump-and-treat oraz ograniczeniu przenikania zanieczyszczeń ze składowiska, stężenia niepożądanych substancji chemicznych mogą spaść do poziomu odpowiedniego dla metod samooczyszczania. W przypadku niezadowolających rezultatów podjęte zostaną aktywne działania zmierzające do przyspieszenia rozpad substancji organicznych i nieorganicznych z wykorzystaniem technik wspomagania procesów samooczyszczania (ang. enhanced monitored natural attenuation).

15.3. Założenia techniczno – technologiczne remediacji

Założenia techniczno-technologiczne remediacji mają charakter ogólnych wytycznych i powinny zostać elastycznie dopasowane do warunków rzeczywistych i na bieżąco zoptymalizowane w ramach gromadzenia doświadczeń w projekcie remediacyjnym. Unikalna technologia planowana do zastosowania w ramach projektu, obejmuje zamknięty system krążenia wód typu grey water footprint – wód pierwotnie zanieczyszczonych w wyniku działalności antropogenicznej, które następnie zostaną oczyszczone lub podczyszczone w ciągu technologicznym i wprowadzone do zanieczyszczonego górotworu, w celu jego skutecznego oczyszczenia (Rys. 34).



Rys. 34. Schemat ideowy instalacji remediacyjnej środowiska gruntowo-wodnego

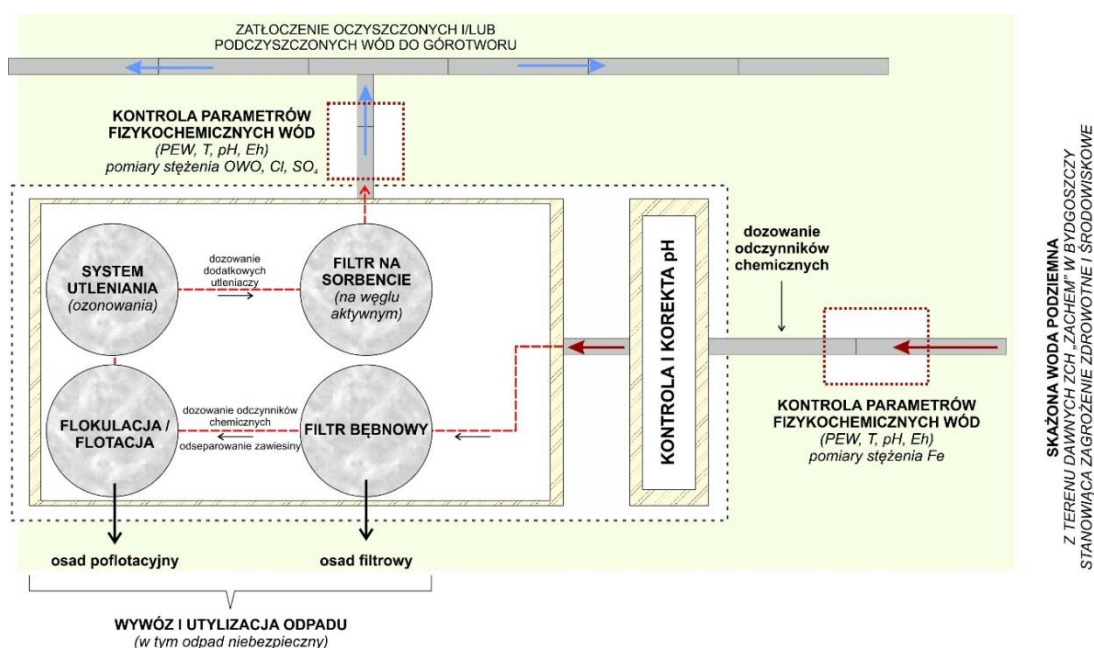
Indywidualnie zaprojektowana instalacja remediacyjna składa się zasadniczo z pięciu modułów:

- (1) zespołu studni pompujących wody skażone z gruntu (zespół 2-3 studni),
- (2) dedykowanej jednostki podczyszczania i/lub oczyszczania wód podziemnych,

- (3) zespołu studni iniekcyjnych zatłaczających podczyszczone i/lub oczyszczone wody do górotworu (zespół 2-3 studni),
- (4) systemu przesyłowego rurociągów doprowadzających wody do dedykowanej jednostki podczyszczania i z niej do studni iniekcyjnych,
- (5) systemu monitoringu i kontroli stanu jakości środowiska gruntowo-wodnego.

Studnie przechwytyjące (do 2-3 szt.) powinny zostać zaprojektowane dla warunków eksploatacji zespołowej z wydajnością sumaryczną do około $50 \div 100 \text{ m}^3/\text{h}$. Głębokość studni powinna wynosić do 30 m, średnica 250-300 mm, długość filtra ok. 15 m. W studniach powinny zostać zabudowane agregaty pompowe o optymalnej wydajności eksploatacyjnej rzędu do około $25\text{-}35 \text{ m}^3/\text{h}$.

Wody odpompowywane z górotworu będą kierowane do dedykowanej instalacji oczyszczania/podczyszczania wód. Technologia oczyszczania powinna zostać zaprojektowana wraz z doбором czynnych substancji używanych w ciągu technologicznym dla maksymalizacji potencjału oczyszczenia i minimalizacji produkcji szkodliwych produktów ubocznych. Innowacyjny dobór koagulantów, odpowiednich utleniaczy i sorbentów pozwala na osiągnięcie postawionego celu w projekcie. Dodatkowo instalacja oczyszczania/podczyszczania powinna docelowo mieć modułową budowę, ułatwiającą jej dostosowanie do specyficznych potrzeb (Rys. 35). Po podczyszczeniu wód w dedykowanej instalacji zostaną one powrotnie zatłoczone do warstwy wodonośnej za pomocą studni iniekcyjnych (do 2-3 szt.) zlokalizowanych w odległości około $200 \div 300 \text{ m}$ w kierunku składowiska „Zielona”.

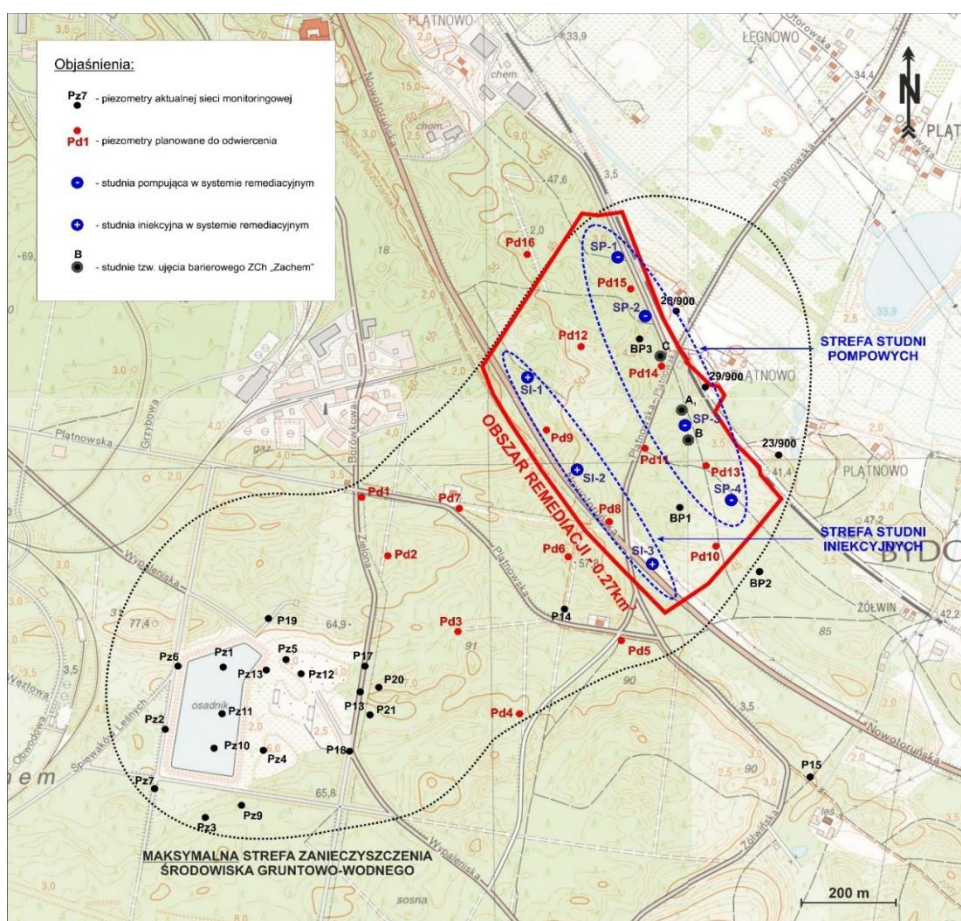


Rys. 35. Schemat ideowy dedykowanej jednostki podczyszczania wód podziemnych

Całej instalacji w postaci studni przechwytyjących, dedykowanej stacji oczyszczania/podczyszczania wód oraz studni iniekcyjnych towarzyszyć musi konieczna dla jej sprawnego funkcjonowania infrastruktura techniczna (m.in. rurociągi przesyłowe, linie i przyłącza elektroenergetyczne, drogi dojazdowe, budynki i pomieszczenia techniczne).

Zgodnie z wykonanymi symulacjami całkowita likwidacja chmury zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wymaga wykonania co najmniej 4 niezależnych paneli studni remedacyjnych. sukcesywnie zbliżających się do ogniska zanieczyszczeń. Czas eksploatacji panelu studni remedacyjnych będzie zależeć od postępu w zakresie oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego i jest szacowany na około 5 lat. Eksploatacja systemu skutecznej remediacji chmury zanieczyszczonych gruntów i wód podziemnych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” przewidywana jest na okresie do około 20 lat.

Ostatni etap remediacji chmury w bezpośrednim sąsiedztwie ogniska zanieczyszczeń wymagał będzie dłuższego czasu i dokładnej kontroli dla skutecznego usunięcia zanieczyszczeń, które z pewnym opóźnieniem mogą emitować się z bryły odpadów przykrytych utworami nieprzepuszczalnymi. Etap ten będzie również obejmował odpompowanie zanieczyszczeń spowodowanych nielegalną depozycją szlamu solankowego na składowisku „Zielona” w kwietniu 2017 r.



Rys. 36. Proponowana konfiguracja panelu remedacyjnego dla etapu I projektu oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego dla składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz ze strefą jego oddziaływania

W ramach prowadzenia prac remedacyjnych dla potrzeb bieżącej kontroli ich postępu oraz mając na uwadze możliwości ich dalszej optymalizacji planuje się wykonanie sieci monitoringu środowiska gruntowo-wodnego. Będzie ona złożona z rosnącej liczby piezometrów, które docelowo osiągną poziom łącznie kilkudziesięciu.

Przykładowa konfiguracja pierwszego panelu remediacyjnego, dla rozpoczęcia działań remediacyjnych na froncie chmury zanieczyszczeń dla obszaru remediacji o powierzchni około 27 ha, została przedstawiona na kolejnym rysunku (Rys. 36). Następne panele remediacyjne należy projektować w sposób elastyczny w nawiązaniu do doświadczeń zgromadzonych w ramach realizacji etapu I, dla uzyskiwania jak największej efektywności procesu oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego.

W odniesieniu do warstw nieprzepuszczalnych stanowiących poziomą i pionowe izolacje bryły odpadów zdeponowanych na składowisku „Zielona” należy zastosować materiały naturalne i/lub sztuczne charakteryzujące się współczynnikiem filtracji (wodoprzewodności) na poziomie poniżej 1×10^{-9} m/s. Miąższość zastosowanej warstwy nieprzepuszczalnej powinna gwarantować jej wysokie parametry izolacyjne i być dostosowana w zależności od przyjętej technologii jej wykonania. W związku z długą historią depozycji na składowisku odpadów przemysłowych „Zielona” i możliwością rozproszenia odpadów w jego sąsiedztwie, działania w zakresie wykonania warstwy izolacyjnej powinny objąć łączną powierzchnię do około 18 ha (około 11 ha składowiska wraz z 7 ha „strefy buforowej”).

Działania związane ze skutecznym unieszkodliwieniem składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” należy podjąć jak najszybciej, w tym optymalnie równolegle z prowadzoną eksploatacją pierwszego panelu studni przechwytyjących i iniekcyjnych dla oczyszczenia środowiska gruntowo-wodnego.

15.4. Weryfikacja skuteczności remediacji

Sprawdzenie skuteczności wykonania remediacji prowadzone będzie poprzez badania środowiskowe gleb i gruntów oraz wód podziemnych na obszarze prowadzonej remediacji. Polegać będą one na poborze próbek:

- 1) **Gleb i gruntów**, z całego profilu górotworu zarówno w strefie powyżej zwierciadła wód podziemnych (strefa aeracji) jak i w obrębie strefy zawodnionej (strefa saturacji). Sposób oraz liczba pobranych próbek gleb i gruntów powinna odpowiadać regulacjom podanym w Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U. 2016 poz. 1395).
- 2) **Wód podziemnych** ze strefy saturacji. Próbkę wód podziemnych powinny zostać pobrane ze wszystkich otworów w obrębie obszaru objętego remediacją, w tym ze studni przechwytyjących i iniekcyjnych oraz otworów piezometrycznych. W celach weryfikacyjnych możliwy jest również pobór próbek wody ze specjalnie wykonanego w tym celu otworu piezometrycznego.

Pobór próbek gleb i gruntów oraz wód podziemnych powinien zostać wykonany z zachowaniem wszelkich norm i standardów w zakresie kontroli jakości, przez podmiot posiadający akredytację w zakresie opróbowania środowiska gruntowo-wodnego.

Weryfikacja skuteczności remediacji będzie wykonywana poprzez określenie poziomu stężeń składników zanieczyszczających wytypowanych jako wskaźniki zanieczyszczenia i przedstawionych w rozdziale 16 dla wszystkich pobranych próbek gleb i gruntów oraz wód podziemnych. Remediacja obszaru zostanie zweryfikowana pozytywnie tylko w przypadku uzyskania stężeń wytypowanych wskaźników zanieczyszczeń niższych od progowych wartości, dla co najmniej 90-95% pobranych próbek gleb i gruntów oraz wód podziemnych.

16. SPOSÓB POTWIERDZENIA PRZEPROWADZENIA REMEDIACJI

16.1. Identyfikacja zanieczyszczeń wskaźnikowych

W ramach badań wskaźnikowych na etapie potwierdzenia przeprowadzenia remediacji wytypowano:

- parametry fizykochemiczne wód (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa – PEW, potencjał redox – Eh),
- parametry nieorganiczne: chlorki (Cl) i siarczany (SO₄),
- parametry organiczne: ogólny węgiel organiczny (TOC), fenol (indeks fenolowy), anilina, toluidyna i sumy BTEX.

Z uwagi na dużą wagę wykonywanych badań, oznaczenia związków organicznych powinny zostać przeprowadzone najlepszą dostępną obecnie metodą, tj. z wykorzystaniem chromatografii gazowej i cieczowej.

16.2. Identyfikacja poziomu stężeń zanieczyszczeń wskaźnikowych koniecznych do uzyskania w ramach remediacji

Zgodnie z założeniami głównego celu przeprowadzonej remediacji, poziom stężeń wskaźnikowych koniecznych do uzyskania w ramach remediacji należy odnieść do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz.U. 2016 poz. 85). Oznacza to, że dla ww. parametrów należy osiągnąć maksymalnie stężenia (Tab. 18):

Tab. 18. Poziomy stężenie zanieczyszczeń wskaźnikowych koniecznych do uzyskania w ramach remediacji

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartości graniczne dla III klasy jakości wód
Parametry fizykochemiczne wód			
1.	Odczyn pH	-	6,5 ÷ 9,5
2.	Ogólny węgiel organiczny (TOC)	mg/L	10
3.	Przewodność elektrolityczna właściwa	μS/cm	2 500
Substancje nieorganiczne:			
4.	Chlorki Cl ⁻	mg/L	250
5.	Siarczany SO ₄ ²⁻	mg/L	250
Substancje organiczne			
6.	Lotne węglowodory aromatyczne BTEX	mg/L	0,1
7.	Fenol (indeks fenolowy)	mg/L	0,01
8.	Anilina	mg/L	0,01*
9.	Toluidyna	mg/L	0,01*

* brak wartości granicznej w RMŚ (Dz.U. 2016 poz. 85), wartości przyjęte jak dla fenolu (indeks fenolowy)

16.3. Badania wymagane dla potrzeb potwierdzenia przeprowadzenia remediacji

Potwierdzenie wykonania remediacji należy zrealizować na podstawie badań wszystkich komponentów środowiska gruntowo-wodnego tj. gruntów oraz wód podziemnych w obrębie obszaru prowadzonej remediacji. Badania te będą związane z:

- 1) **Systemu badań on-line** – dla pomiaru wybranych parametrów wskaźnikowych (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh oraz w miarę możliwości chlorki, siarczany i ogólny węgiel organiczny (TOC)).

Pomiary on-line powinny być realizowane w minimalnie około 5-6 kluczowych punktach instalacji oczyszczania/podczyszczania wód, gdzie oznaczaniu podlegać będą podstawowe parametry fizykochemiczne wód (odczyn pH, temperatura, potencjał redox Eh, przewodność elektrolityczna właściwa oraz w miarę możliwości chlorki, siarczany i zawartość węgla organicznego i in.). Przy czym najważniejsze znaczenie dla potwierdzenia wykonania remediacji mają punkty na wejściu i wyjściu z jednostki oczyszczania/podczyszczania wód.

- 2) **Systemu badań monitoringowych** – dla pomiaru wszystkich parametrów wskaźnikowych oraz parametrów dodatkowych, oparty o pobory próbek wód podziemnych ze studni i piezometrów w obrębie obszaru remediacji oraz ich oznaczenia w warunkach laboratoryjnych. System ten został szczegółowo scharakteryzowany w kolejnym rozdziale niniejszego opracowania.
- 3) **Systemu badań dodatkowych** – realizowanych w specjalnie wykonywanych otworach wiertniczych w obrębie obszaru prowadzonej remediacji, dla potrzeb poboru próbek gruntów i wód podziemnych w celu potwierdzenia występowania wartości parametrów wskaźnikowych (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh, chlorki, siarczany, ogólny węgiel organiczny (TOC), fenole (indeks fenolowy), anilina, toluidyna i suma BTEX) obniżonych do przyjętych wartości progowych dla zadowalającego stanu środowiska. Liczba odwiercanych otworów dla potrzeb potwierdzenia skuteczności remediacji powinna być dopasowana do rozmiaru obszaru remediacji, zapewniając reprezentatywność przeprowadzonych badań sprawdzających.

Obniżenie stężeń zanieczyszczeń wskaźnikowych w wodach podziemnych i gruntach do wartości granicznych, będzie oznaczało osiągnięcie zamierzonego, głównego celu remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” S.A. w Bydgoszczy oraz remediacji środowiska gruntowo-wodnego w obszarze oddziaływania składowiska. Jak już wspomniano wcześniej remediacja obszaru zostanie uznana za zrealizowaną tylko w przypadku uzyskania stężeń wytypowanych wskaźników zanieczyszczeń niższych od progowych wartości, dla co najmniej 90-95% pobranych próbek gleb i gruntów oraz wód podziemnych.

17. WYTYCZNE DLA PROWADZENIA BADAŃ MONITORINGOWYCH

17.1. Etap przed rozpoczęciem remediacji

Badania wód podziemnych należą do jednych z najbardziej kosztownych badań środowiskowych. Wymagają one bowiem nie tylko uzyskania dostępu do wód podziemnych, poprzez wykonanie odpowiednich odwiertów – studni i piezometrów, ale również związane są z zastosowaniem zaawansowanej metodyki badawczej. Warunkuje ona w największym stopniu jakość uzyskiwanych wyników tj. rozwiązanie kluczowego problemu reprezentatywności wykonanych badań.

Reprezentatywne badanie jest warunkiem koniecznym dla wiarygodnej diagnozy stanu środowiska wodnego i obejmuje cztery podstawowe elementy:

- wybór odpowiedniej lokalizacji punktów badawczych,
- proporcjonalne uwzględnienie wód zarówno naturalnych „czystych” jak i w różnym stopniu zanieczyszczonych,
- odpowiedni pobór próbki wody, a następnie jej opcjonalna konserwacja, przechowywanie i przekazanie do laboratorium,
- zastosowanie metod analitycznych o wysokiej dokładności (metod referencyjnych).

Dbałość o wypełnienie wszystkich wymienionych kryteriów warunkuje reprezentatywne, tj. odpowiadające rzeczywistości, rozpoznanie stanu zanieczyszczenia środowiska wód podziemnych. Każdy z wymienionych elementów jest w tym kontekście istotny, lecz największe znaczenie zazwyczaj przypisuje się procedurze poboru próbki wody do badań składu chemicznego. Niezastosowanie się do obowiązujących obecnie standardów i wytycznych skutkuje w tym przypadku zaprzepaszczeniem całego trudu poświęconego dla rozpoznania stanu środowiska wód podziemnych. Niespełniający standardów reprezentatywności pobór próbek wody przekłada się bowiem najsilniej na uzyskiwane w laboratorium wyniki badań parametrów fizykochemicznych.

Badania monitoringowe poprzedzające etap remediacji powinny obejmować jednorazowe, szczegółowe zbadanie aktualnego stanu środowiska gruntowo-wodnego we wszystkich dostępnych, zinwentaryzowanych otworach hydrogeologicznych (piezometry, studnie, studnie kopane). Badania te pozwolą udokumentować tzw. stan „wyjściowy” prac remediacyjnych. Do sieci monitoringowej dawnych ZCh „Zachem” zlokalizowanych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz w zasięgu wpływu składowiska na środowisko gruntowo-wodne należą piezometry:

- Pz1, Pz2, Pz3, Pz4, Pz5, Pz6, Pz7, Pz9, Pz10, Pz11, Pz12, Pz13;
- P14, P17, P18, P19, P20, P21;
- BP1, BP2, BP3;
- studnie ujęcia barierowego: A₁, B, C;
- 23/900, 28/900 i 29/900.

Przyjęcie jednolitej metodyki badawczej wraz z powtarzalnością pomiarów zapewnia reprezentatywność wyników uzyskanych z sieci monitoringowej. Dlatego zaleca się ujednolicenie wszelkich działań związanych z monitorowaniem stanu chemicznego środowiska gruntowo – wodnego. Należy pamiętać, że największe i nieodwracalne błędy można popełnić na etapie poboru prób.

Pomiary lokalizacyjne otworów hydrogeologicznych należy wykonać urządzeniem z wbudowanym GPS, w tym również telefonem komórkowym wyposażonym w odpowiednią aplikację, z podaniem dokładności pomiaru. Pomiary techniczne konstrukcji studni należy wykonać taśmą mierniczą z dokładnością do 0,5 cm. W odniesieniu do pomiaru zalegania poziomu zwierciadła wód podziemnych i głębokości piezometru i/lub studni, dokonywanych z dokładnością do 1,0 cm, należy wykorzystać standardową, akustyczną lub elektryczną świstawkę hydrogeologiczną.

W ramach badań szczegółowych należy wykonać pompowania oczyszczające nieużywanych lub użytkowanych w niewielkim stopniu indywidualnych studni ujęciowych oraz piezometrów. Ilość wody usuniętej z tego typu obiektów powinna wynosić około 2-3 objętości zgromadzonego w nich słupa wody i zazwyczaj nie powinna przekraczać poziomu około 0,5 – 1 m³. Tylko w przypadku studni kopanych o średnicy do 1 m konieczne może okazać się odpompowanie do około 3 m³ wód. Z uwagi na możliwość wystąpienia w odpompowywanych wodach zanieczyszczeń mutagennych i kancerogennych konieczne jest ich odprowadzanie do szczelnych zbiorników, a następnie przekazanie ich do oczyszczalni ścieków. Z pompowania oczyszczającego można zrezygnować jedynie w przypadku studni o stałym i stosunkowo wysokim poborze wody (w granicach przekraczających poziom 0,5-1 m³/d).

Po zakończeniu pompowania oczyszczającego należy odczekać, aż słup wody w otworach się odbuduje i nabierze cech pierwotnych, tj. będzie wykazywał zmienność strefową zanieczyszczenia, charakterystyczną dla obszaru wpływu dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy na środowisko wodne. Kolejnym etapem jest wykonanie terenowych pomiarów wybranych parametrów fizykochemicznych wód (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh), a następnie pobranie próbki wody do badań hydrogeochemicznych. Wstępne badania stratyfikacji w otworze (pomiar parametrów fizykochemicznych *in situ* PEW i T) można wykonać kontrolnie przed rozpoczęciem pompowania oczyszczającego, a następnie ponowić je po odbudowie słupa wody w otworze. Zaleca się pobór wody podziemnej przy pomocy pomp perystaltycznych o małej wydajności (0,5-1 l/min) pozwalającej na pobranie próby bez zaburzenia stratyfikacji panującej w otworze.

Próbka wody powinna zostać pobrana do:

- jednorazowej butelki o pojemności około 150-250 ml (oznaczenie składników nieorganicznych),
- butelki szklanej o pojemności 250-500 ml (oznaczenie TOC),
- ciemnej butelki szklanej o pojemności 1000 ml (oznaczenie składników organicznych).

Po przekazaniu do laboratorium w próbkach wody należy oznaczyć zawartość:

- składników nieorganicznych: Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃, SiO₂, NO₃, NO₂, NH₄ oraz As, Al, B, Ba, Cr, Co, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, PO₄, Sb, Sr, a także w miarę możliwości innych pozostałych pierwiastków śladowych.
- składników organicznych: ogólnego węgla organicznego (TOC), fenolu, aniliny oraz składników BTEX (benzen, toluen, etylobenzen, ksylen), difenylosulfonu, chloroaniliny, epichlorohydryny, hydroksybifenyli, nitrobenzenu, oktylofenoli, toluenodiaminy, toluidyny, sumy WWA, suma AOX, a także PCE i TCE.

Z uwagi na dużą wagę wykonywanych badań oznaczenia związków organicznych powinny zostać przeprowadzone najlepszymi dostępnymi obecnie metodami tj. z wykorzystaniem spektrometrii masowej i atomowej emisyjnej oraz chromatografii gazowej i cieczowej. Zaleca się również wykonywanie wszelkich analiz chemicznych wód podziemnych w laboratoriach akredytowanych z wdrożonym programem QA/QC (program kontroli/zapewniania jakości badań) i/lub posiadających duże doświadczenie w badaniach wód skażonych pochodzących z Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy.

17.2. Etap remediacji

Cykliczne badania wskaźnikowe należy prowadzić w dostępnych i zinwentaryzowanych otworach hydrogeologicznych zlokalizowanych w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz na obszarze wpływu składowiska na środowisko gruntowo-wodne (Pz1, Pz2, Pz3, Pz4, Pz5, Pz6, Pz7, Pz9, Pz10, Pz11, Pz12, Pz13, P14, P17, P18, P19, P20, P21, BP1, BP2, BP3, studnie ujęcia barierowego: A₁, B, C; 23/900, 28/900 i 29/900 oraz odwierconych dla potrzeb remediacji). Po wykonaniu oznaczeń parametrów fizykochemicznych wód podziemnych (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh) należy pobrać próbkę.

Próbka wody z punktów monitoringowych powinna być pobrana z dennej części piezometru, z uwagi na udokumentowane najwyższe stężenia zanieczyszczeń w chmurze, występujące właśnie w tej strefie (chyba, że badania szczegółowe poprzedzające remediację wykażą inną strefę o maksymalnym zanieczyszczeniu). Probka wody powinna zostać pobrana do:

- jednorazowej butelki PE lub PP o pojemności około 150-200 ml (oznaczenie Cl i SO₄),
- butelki szklanej o pojemności 250-500 ml (oznaczenie TOC),
- ciemnej butelki szklanej o pojemności 1000 ml (oznaczenie fenolu (indeks fenolowy), aniliny i toluidyny).

Po przekazaniu do laboratorium w próbkach wody należy oznaczyć zawartość zanieczyszczeń wskaźnikowych z zastosowaniem najlepszych dostępnych obecnie metod tj. z wykorzystaniem chromatografii gazowej i cieczowej.

Badania hydrogeochemiczne parametrów wskaźnikowych (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh, chlorki, siarczany, ogólny węgiel organiczny (TOC), fenole (indeks fenolowy), anilina, toluidyna i suma BTEX) dla przypadku remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego wpływu na środowisko gruntowo-wodne, powinny być wykonywane z minimalną częstotliwością 1 raz na półrocze. Z częstotliwością 1 raz na rok proponuje się również realizować pełniejsze badania monitoringowe, w szerokim zakresie parametrów fizykochemicznych, jakie zostały określone dla etapu przed rozpoczęciem remediacji.

17.3. Etap po zakończeniu remediacji

Po upływie 20 lat remediacji i potwierdzeniu jej skuteczności badania monitoringowe ze względów finansowych mogą być ograniczone w aspekcie ilości otworów hydrogeologicznych poddanych badaniom oraz zakresu oznaczeń parametrów chemicznych.

Proponuje się zatem realizację badań hydrogeochemicznych 1 raz na rok w piezometrach dobranych w sposób zapewniający reprezentatywne rozpoznanie obszaru będącego w zasięgu dawnej chmury zanieczyszczeń ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”. Zakres badań wód podziemnych musi obejmować co najmniej pomiary parametrów fizykochemicznych wód podziemnych uznanych za wskaźnikowe dla przypadku składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh, chlorki, siarczany, ogólny węgiel organiczny (TOC), fenole (indeks fenolowy), anilina, toluidyna i suma BTEX).

Z częstotliwością raz na 3-5 lat proponuje się również realizować pełniejsze badania monitoringowe, w szerokim zakresie parametrów fizykochemicznych, jakie zostały określone dla etapu przed rozpoczęciem remediacji.

18. HARMONOGRAM CZASOWY REMEDIACJI

Planowane działania remediacyjne dla składowiska odpadów „Zielona” wraz ze strefą jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne (tj. chmura zanieczyszczeń) prowadzone będą w okresie 20 lat, zgodnie z harmonogramem przedstawionym dla wariantów 2, 3 i 4 – uznanych za optymalne. Harmonogram obejmuje (Rys. 37):

- 1) Prace projektowe i badawcze – wykonywane w 1 roku projektu;
- 2) Unieszkodliwienie składowiska odpadów „Zielona” – wykonywane w okresie 2-4 roku projektu;
- 3) Wykonanie systemu remediacji wód podziemnych i gruntów – w postaci 4 paneli wykonywanych sukcesywnie w 1, 5, 10 i 15 roku projektu;
- 4) Eksploatację systemów remediacji wód podziemnych i gruntów – prowadzoną za pomocą kolejnych paneli w całym okresie projektu (20 lat);
- 5) Prace dodatkowe – zaplanowane na zakończenie projektu i realizowane w 19 i 20 roku.

WARIANTY nr 2-4 (optymalne)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PRACE BADAWCZE I PROJEKTOWE																				
LIKWIDACJA LUB UNIESZKODLIWIENIE SKŁADOWISKA																				
WYKONANIE SYSTEMU REMEDIACJI																				
EKSPLOATACJA SYSTEMÓW REMEDIACJI																				
PRACE DODATKOWE																				

Rys. 37. Harmonogram optymalnych wariantów remediacji dla składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne

19. KOSZTORYS DZIAŁAŃ REMEDIACYJNYCH

Systemy remediacyjne, zarówno metoda pompowania wód zanieczyszczonych z oczyszczaniem oraz posadowienie przesłon hydroizolacyjnych są stosunkowo kosztowne. Czynniki, które determinują kwestie ekonomiczne są związane z (wg Holden i in., 1998):

- wyznaczeniem standardów jakości wód podziemnych. jakie należy osiągnąć.
- charakterystyką substancji zanieczyszczających wraz z ogniskiem (z uwzględnieniem podstawowych właściwości jak rozpuszczalność i/lub sorpcja).
- rozpoznaniem warunków hydrogeologicznych.
- oceną zasięgu ogniska oraz chmury zanieczyszczeń.
- czasem. jaki upłynął od uwolnienia zanieczyszczeń do górotworu.
- oceną wydajności wybranej metody oraz wdrożonego systemu. koszty konstrukcyjne.
- przewidzianymi standardami jakości wód uzyskanymi po oczyszczeniu.
- wykonaniem instalacji zrzutu i/lub oczyszczenia wypompowanych wód na powierzchni terenu.
- działaniami ograniczającymi emisję zanieczyszczeń powietrza.
- kosztami utrzymania instalacji (m. in. prąd) oraz napraw i konserwacji.
- przewidywanymi wymaganiami monitoringowymi.

Wszystkie przedstawione powyżej uwarunkowania zostały uwzględnione w analizie kosztów poszczególnych wariantów remediacji rozważanych dla składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” i przedstawionych szczegółowo w rozdziale 13 niniejszego opracowania. Różnice w całkowitych kosztach najtańszego i najdroższego z optymalnych wariantów remediacyjnych wynoszą 66,45 mln zł, tj. nie przekraczają 10% kosztów sumarycznych, które zawierają się w przedziale 749,10 – 817,35 mln zł. Różnice te są związane z innym sposobem unieszkodliwienia składowiska odpadów. Koszty remediacji wód podziemnych i gruntów dla wszystkich wariantów optymalnych są identyczne i wynoszą około 665,6 mln zł (Tab. 19).

Tab. 19. Porównanie kosztów na realizację optymalnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [mln zł]

RODZAJ DZIAŁAŃ	WARIANT NR 2	WARIANT NR 3	WARIANT NR 4
	warianty optymalne		
Prace badawcze i projektowe	10,0	10,0	10,0
Likwidacja lub unieszkodliwienie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	91,3	126,75	58,5
Wykonanie systemu remediacji środowiska gruntowo-wodnego MP&T	35,0	35,0	35,0
Eksploatacja systemów remediacji MP&T	630,6	630,6	630,6
Prace dodatkowe	15,0	15,0	15,0
SUMA	781,9	817,35	749,1

20. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

- I. Projekt planu remediacji obejmuje teren składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne, określonym na podstawie miarodajnych i reprezentatywnych wyników badań i analiz, w szczególności zaawansowanych badań środowiska gruntowo-wodnego i modelowań numerycznych wykonanych w latach 2008-2017 przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie.
- II. Projekt planu remediacji opracowany został w formie pozwalającej na jego wykorzystanie do wydania decyzji, o której mowa w art. 101m ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2017 r., poz. 519 t.j.) lub decyzji o której mowa w art. 15 ustawy z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie (Dz. U. z 2014 r. poz. 1789 ze zm.). Projekt planu remediacji zawiera wiążące wytyczne do opracowania wykonawczego projektu remediacji, w którym określony zostanie szczegółowy sposób remediacji ustalający m.in. parametry techniczne dla wszystkich obiektów i urządzeń przewidzianych do zastosowania.
- III. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” zbudowane jest z trzech kompleksów, tj. mniejszych obszarów depozycji odpadów, odpowiednio od zachodu: (1) Izolowanego Składowiska Osadów (ISO), (2) składowiska odpadów niebezpiecznych w dawnym wyrobisku piasku oraz (3) składowiska ogólnozakładowego odpadów innych niż niebezpieczne. Składowisko położone w granicach dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy zlokalizowane jest pomiędzy ul. Zieloną i ul. Elektryczną, a obejmuje działki ewidencyjne lub ich fragmenty o numerach: 9/95, 9/96, 9/97, 9/99, 9/101, 9/103, 9/105 i 9/107.
- IV. Chmura zanieczyszczonych wód podziemnych, genetycznie związanych ze składowiskiem „Zielona” migruje w warstwie wodonośnej, na wschód i północny – wschód w kierunku terenów zamieszkałych położonych w dolinie Wisły (Łęgowo, Otorowo, Płatnowo). Chmura przemieszcza się w gruntach podścielających łącznie 28 działek i fragmentów działek ewidencyjnych: 86/1, 85/3, 8, 10, 1a, 7, 9, 11, 82/9, 13a, 1b, 12, 2, 3, 96, 1/50, 9/20, 9/21, 13b, 91, 35, 1/6, 90/8, 8, 90/7, 10/2, 10/1.
- V. Powierzchnia terenu wymagającego przeprowadzenia remediacji, gdzie zanieczyszczenia są stwierdzone w obrębie środowiska gruntowo-wodnego wynosi około 108,518 ha. Przy czym składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” zajmuje sumaryczną powierzchnię około 11,3 ha, z czego około 4,3 ha przypada na Izolowane Składowisko Odpadów (ISO), zaś na pozostałe kompleksy składowisk około 7 ha.
- VI. Większość powierzchni obejmującej strefę oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” należy do Skarbu Państwa i znajduje się w użytkowaniu wieczystym Lasów Państwowych. Pozostałe niewielkie działki również są własnością Skarbu Państwa, lecz znajdują się w użytkowaniu wieczystym: (a) Infrastruktury Kapuściska S.A. w upadłości likwidacyjnej, (b) Miasta Bydgoszcz oraz (c) innych podmiotów, w tym prywatnych.

- VII. W strefie niekorzystnego oddziaływania składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, gleby i grunty są zanieczyszczone: (a) w strefie przypowierzchniowej – w bezpośrednim sąsiedztwie składowiska i jego bezpośrednim podłożu; (b) w strefie głębszej – w obrębie chmury zanieczyszczeń przemieszczających się w środowisku gruntowo-wodnym ze składowiska w kierunku doliny Wisły. W większej odległości od składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” gleby i grunty w strefie przypowierzchniowej zazwyczaj nie są zanieczyszczone. Niemniej nie można wykluczyć występowania stref zanieczyszczonych z innych niezidentyfikowanych dotychczas ognisk.
- VIII. W rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” stwierdzono występowanie czwartorzędowego piętra wodonośnego we fluwiogłacjalnych piaskach drobno- i średnioziarnistych oraz żwirach. Warstwa utworów przepuszczalnych związana jest z obniżeniem stropu zalegających głębiej utworów słabo przepuszczalnych – glin zwałowych i iłów. Zwierciadło wód podziemnych ma charakter swobodny, a kierunki przepływu są determinowane poprzez występujące wypiętrzenia i wkładki utworów słabo przepuszczalnych. Generalny kierunek przepływu wód odbywa się w kierunku północnego wschodu i wschodu, ku dolinie Wisły. W strumieniu wód podziemnych zanieczyszczenia przenikające ze składowiska „Zielona” przemieściły się na odległość około 1,2-1,5 km od tego ogniska i przemieszczają się dalej docelowo do rzeki Wisły.
- IX. W świetle prowadzonych badań hydrogeochemicznych oraz aktualnego stanu składowiska „Zielona” zidentyfikowane zostało zanieczyszczenie środowiska gruntowo – wodnego, substancjami zarówno o charakterze nieorganicznym (m.in. chlorki, siarczany, pierwiastki metaliczne i śladowe) jak i organicznym (fenol; anilina, toluidyna i chloroanilina; oktylofenole i estry oktylofenolooksyetylenowe; hydroksybifenyle; difenylosulfon oraz związki haloorganiczne – AOX). Praktycznie wszystkie z wymienionych substancji organicznych charakteryzują się dużą toksycznością, a wiele posiada znaczący potencjał mutageny i kancerogeny. Stężenia wszystkich substancji zanieczyszczających są bardzo wysokie i występują na poziomach nienotowanych dla podobnych obiektów i obszarów nie tylko w Polsce, ale i na świecie.
- X. Migracja chmury zanieczyszczonych wód podziemnych ze składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na tereny zamieszkałe jest problemem powodującym bezpośrednie zagrożenie zdrowia, a nawet życia lokalnych mieszkańców Bydgoszczy i pobliskich wsi: Otorowo, Płątnowo i Łęgowo. Obecnie bowiem, wobec wyłączenia bariery odwadniającej chmura zanieczyszczeń z rejonu składowiska „Zielona” ma możliwość swobodnej migracji na teren wykorzystywany w celach rolniczych i mieszkalnych. Poprzez bezpośredni kontakt mieszkańców ze skażoną wodą, która ujawnia się m.in. w studniach kopanych, narażeni są na wchłanianie substancji organicznych o charakterze mutagenym, toksycznym, a często także klasyfikowanych jako kancerogenne.

- XI. Zanieczyszczenia organiczne są bardzo łatwo asymilowane przez rośliny, zarówno na wysoczyźnie w rejonie składowiska, ale przede wszystkim na terasie Wisły, gdzie zwierciadło wód zalega płytko. Potencjalna skala zasorbowanych zanieczyszczeń w biomasie może być bardzo duża a szczególnym przypadkiem jest m.in. anilina działająca destrukcyjnie na wszelkie organizmy wodne. Bardzo duże niebezpieczeństwo niesie za sobą fakt, iż mieszkańcy użytkują zanieczyszczone wody podziemne w celach ogrodniczych, do mycia i/lub nawadniania upraw. Wspomniane przesłanki muszą być jednak potwierdzone szczegółowymi badaniami z zakresu rolnictwa, ichtiologii, leśnictwa i technologii spożywczej.
- XII. Głównym celem remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” na terenie dawnych Zakładów Chemicznych „Zachem” S.A. w Bydgoszczy oraz remediacji środowiska gruntowo-wodnego w obszarze oddziaływania tego składowiska jest osiągnięcie tzw. dobrego stanu chemicznego wód podziemnych, tj. parametrów granicznych dla III klasy jakościowej. Wody podziemne w tej klasie określić można jako wody o zadowalającej jakości, gdzie w warunkach naturalnych wartości wskaźników jakościowych są podwyższone w wyniku naturalnych procesów lub słabego oddziaływania antropogenicznego. Cel jakościowy w odniesieniu do wód podziemnych będzie zatem spełniał wszystkie wymagania stężeń substancji nieorganicznych i organicznych oraz parametrów fizykochemicznych zawartych w załączniku Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz.U. 2016 poz. 85).
- XIII. W odniesieniu do poziomu stężeń substancji zanieczyszczających w obrębie gleb i gruntów, stanowiących niemobilny element środowiska gruntowo-wodnego jako cel remediacji przyjmuje się maksymalne wartości składników chemicznych dla grupy gruntów IV, podane w Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U. 2016 poz. 1395). W przypadku braku tego typu wartości progowej jako cel remediacji gleb i gruntów przyjmuje się poziom substancji chemicznej nie powodujący ryzyka wystąpienia zagrożeń dla zdrowia ludzi i dla stanu środowiska.
- XIV. Generalny plan przeprowadzenia procesu remediacji polega na odpompowaniu masy zanieczyszczonych wód podziemnych za pomocą studni przechwytujących i po ich oczyszczeniu/podczyszczeniu na dedykowanej instalacji powrotne ich wtłoczenie do górotworu za pośrednictwem studni iniekcyjnych, w celu usunięcia zanieczyszczeń zasorbowanych na fazie niemobilnej tj. w obrębie gruntów budujących warstwę wodonośną. Proponowana do zastosowania dla rejonu składowiska odpadów „Zielona” technika remediacji nosi angielską nazwę „pump-and-treat” tj. w tłumaczeniu na język polski „pompuj i oczyszczaj”. W związku ze znacznym rozmiarem zanieczyszczonego środowiska gruntowo-wodnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”, obejmującym obszar ponad 108,518 ha działania te prowadzone będą w kilku następujących po sobie etapach (panelach remediacyjnych), rozpoczynając od strefy frontu chmury zanieczyszczeń i sukcesywnie zbliżając się w kierunku ogniska zanieczyszczeń.

- XV.** Dla potrzeb wyboru optymalnego wariantu remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne dokonano analizy łącznie różnych 4 wariantów. W oparciu o kryteria skuteczności, czasu trwania oraz kosztów remediacji za optymalne scenariusze, w pełni ze sobą równoważne uznano warianty 2, 3 i 4. Warianty te zakładają w odniesieniu do składowiska odpadów „Zielona” różne sposoby jego unieszkodliwienia: częściowe usunięcie najbardziej toksycznych odpadów, wykonanie przykrycia warstwą izolacyjną czy też wykorzystanie pionowych przesłon izolacyjnych (ścianek szczelnych). W związku z bardzo wysokimi stężeniami substancji nieorganicznych i organicznych w wodach podziemnych, remediacja chmury zanieczyszczeń będzie realizowana metodą pum-and-treat, w 4 etapach.
- XVI.** Unieszkodliwieniu ogniska zanieczyszczeń tj. składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” prowadzone będzie w celu skutecznego ograniczenia lub całkowitej likwidacji dalszych możliwości emisji zanieczyszczeń z masy zdeponowanych odpadów. W związku z powyższym należy wykonać: (a) sarkofag złożony z wierzchniej warstwy izolacyjnej, przykrywającej składowisko oraz opcjonalnie z okonturowujących go pionowych przesłon izolacyjnych od powierzchni terenu do nieprzepuszczalnego podłoża lub (b) zastosowania tylko wierzchniej warstwy nieprzepuszczalnej o podwyższonych parametrach izolacyjnych. Obliczenia analityczne wskazują, że odcięcie możliwości wnikania wód opadowych do bryły składowanych odpadów skutecznie zatrzyma proces wymywania zanieczyszczeń do wód podziemnych. Zanieczyszczenia już wymyte zostaną odpompowane w ostatnim etapie (nr 4) remediacji chmury zanieczyszczonych wód podziemnych. Z uwagi na bardzo wysokie koszty wywozu i unieszkodliwienia odpadów całkowita likwidacja ogniska zanieczyszczeń jest nierealna.
- XVII.** W końcowym okresie remediacji środowiska gruntowo-wodnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” proponuje się rozpoczęcie obserwacji procesów samooczyszczania (ang. natural attenuation), pod kątem ich przebiegu w omawianym przypadku oraz oceny realnych możliwości dalszego samoczynnego polepszania stanu środowiska wodnego. W przypadku niezadowalających rezultatów podjęte zostaną aktywne działania zmierzające do przyspieszenia rozpad substancji organicznych i nieorganicznych z wykorzystaniem technik wspomagania procesów samooczyszczania (ang. enhanced monitored natural attenuation).
- XVIII.** Unikalna technologia planowana do zastosowania w ramach projektu, obejmuje zamknięty system krążenia wód typu grey water footprint, które następnie zostaną oczyszczone lub podczyszczone w ciągu technologicznym i wprowadzone do zanieczyszczonego górotworu, w celu jego skutecznego oczyszczenia. Indywidualnie zaprojektowana instalacja remediacyjna składa się zasadniczo z pięciu modułów: (1) zespołu studni pompujących z gruntu wody skażone (zespół 3-4 studni), (2) dedykowanej jednostki podczyszczania i/lub oczyszczania wód podziemnych, (3) zespołu studni iniekcyjnych zatłaczających podczyszczone i/lub oczyszczone wody do górotworu (zespół 2-3 studni), (4) systemu przesyłowego rurociągów doprowadzających wody do dedykowanej jednostki podczyszczania i z niej do studni iniekcyjnych, (5) systemu monitoringu i kontroli stanu jakości środowiska gruntowo-wodnego.

- XIX.** W odniesieniu do warstw nieprzepuszczalnych stanowiących poziomą i pionowe izolacje bryły odpadów zdeponowanych na składowisku „Zielona” należy zastosować materiały naturalne i/lub sztuczne charakteryzujące się współczynnikiem filtracji (wodoprzewodności) na poziomie poniżej 1×10^{-9} m/s. Miąższość zastosowanej warstwy nieprzepuszczalnej powinna gwarantować jej wysokie parametry izolacyjne i być dostosowana w zależności od przyjętej technologii jej wykonania. W związku z długą historią depozycji na składowisku odpadów przemysłowych „Zielona” i możliwością rozproszenia odpadów w jego sąsiedztwie, działania w zakresie wykonania warstwy izolacyjnej powinny objąć łączną powierzchnię do około 18 ha (około 11 ha składowiska wraz z 7 ha strefy „buforowej”).
- XX.** Weryfikacja skuteczności remediacji będzie wykonywana poprzez określenie poziomu stężeń składników zanieczyszczających wytypowanych jako wskaźniki zanieczyszczenia: temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh, chlorki, siarczany, ogólny węgiel organiczny (TOC), fenole (indeks fenolowy), anilina, toluidyna i suma BTEX, w próbkach gleb i gruntów oraz wód podziemnych.
- XXI.** Dane do weryfikacji przebiegu i skuteczności remediacji obszaru składowiska „Zielona” wraz ze strefą jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne (chmurą zanieczyszczeń) będą pochodzić z: (a) systemu pomiarów on-line, obejmującym wybrane parametry wskaźnikowe (temperatura, odczyn pH, przewodność elektrolityczna właściwa, potencjał redox – Eh oraz w miarę możliwości chlorki, siarczany i ogólny węgiel organiczny (TOC)) na wejściu i wyjściu z jednostki oczyszczania/podczyszczania wód, (b) systemu badań monitoringowych – dla pomiaru wszystkich parametrów wskaźnikowych oraz parametrów dodatkowych, oparty o pobory próbek wód podziemnych ze studni i piezometrów w obrębie obszaru remediacji oraz ich oznaczenia w warunkach laboratoryjnych oraz (c) systemu badań dodatkowych – realizowanych w specjalnie wykonywanych otworach wiertniczych w obrębie obszaru prowadzonej remediacji, dla potrzeb poboru próbek gruntów i wód podziemnych w celu potwierdzenia występowania wartości parametrów wskaźnikowych obniżonych do przyjętych wartości progowych dla zadowalającego stanu środowiska. Liczba odwiercanych otworów dla potrzeb potwierdzenia skuteczności remediacji powinna być dopasowana do rozmiaru obszaru remediacji, zapewniając reprezentatywność przeprowadzonych badań sprawdzających.
- XXII.** Planowane działania remediacyjne dla składowiska odpadów „Zielona” wraz ze strefą jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne (tj. chmura zanieczyszczeń) prowadzone będą w okresie 20 lat, zgodnie z harmonogramem przedstawionym dla wariantów 2, 3 i 4 – uznanych za optymalne. Harmonogram obejmuje: (1) Prace projektowe i badawcze – wykonywane w 1 roku projektu; (2) Unieszkodliwienie składowiska odpadów „Zielona” – wykonywane w okresie 2-4 roku projektu; (3) Wykonanie systemu remediacji wód podziemnych i gruntów – w postaci 4 paneli wykonywanych sukcesywnie w 1, 5, 10 i 15 roku projektu; (4) Eksploatację systemów remediacji wód podziemnych i gruntów – prowadzoną za pomocą kolejnych paneli w całym okresie projektu (20 lat); (5) Prace dodatkowe – zaplanowane na zakończenie projektu i realizowane w 19 i 20 roku.

- XXIII.** Remediacja obszaru zostanie zweryfikowana pozytywnie tylko w przypadku uzyskania stężeń wytypowanych wskaźników zanieczyszczeń niższych od progowych wartości, dla co najmniej 90-95% pobranych próbek gleb i gruntów oraz wód podziemnych.
- XXIV.** Różnice w całkowitych kosztach najtańszego i najdroższego z optymalnych wariantów remediacyjnych wynoszą 66,45 mln zł, tj. nie przekraczają 10% kosztów sumarycznych, które zawierają się w przedziale 749,10 – 817,35 mln zł. Różnice te są związane z innym sposobem unieszkodliwienia składowiska odpadów, które zawierają się w przedziale 58,5 - 126,75 mln zł. Koszty remediacji wód podziemnych i gruntów dla wszystkich wariantów optymalnych są identyczne i wynoszą około 665,6 mln zł. Na identycznym poziomie przewidziano również koszty prac badawczych i projektowych oraz dodatkowych (20 mln zł). Koszty remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” lecz przede wszystkim strefy zanieczyszczonego środowiska gruntowo-wodnego rozłożone będą w czasie na okres 20 lat i zasadniczo podzielone na 4 etapy wyceniane na około 150 -200 mln zł.
- XXV.** Uruchomienie już pierwszego etapu remediacji obszaru składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz ze strefą jego niekorzystnego oddziaływania na środowisko wodne w skuteczny sposób rozwiązuje problem poważnych zagrożeń zdrowotnych dla mieszkańców terenu terasy Wisły (Otorowo, Płatnowo i Łęgnowo). Etap ten związany jest z powstrzymaniem dalszej propagacji substancji toksycznych i oczyszczaniem środowiska gruntowo-wodnego w strefie zlokalizowanej w pobliżu frontu chmury zanieczyszczeń. Z racji relatywnie niższych stężeń zanieczyszczeń w tej strefie szacunkowy koszt wykonania pierwszego etapu remediacyjnego, trwającego 5 lat, będzie wynosił do około 100 mln zł.
- XXVI.** Kolejnym działaniem w zakresie realizacji niniejszego planu remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” jest skuteczne unieszkodliwienie składowiska – aktywnego ogniska zanieczyszczeń. Działanie to konieczne do jak najszybszego wdrożenia, wymagać będzie nakładów finansowych na poziomie do 100 mln zł, niemniej skutkować będzie całkowitym zaprzestaniem emisji zanieczyszczeń do środowiska gruntowo-wodnego. Optymalnym czasem rozpoczęcia działań unieszkodliwiających składowisko jest okres eksploatacji pierwszego panelu oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego za pomocą studni przechwytyjących, jednostki do oczyszczania/podczyszczania wód oraz studni iniekcyjnych.

21. WYKORZYSTANE MATERIAŁY

1. Andrzejewski W., Pachurka A., Urban R., Wesołowski P., 2010 – Dokumentacja geologiczna określająca stopień zanieczyszczenia związkami fenolowymi oraz zasięgu zalegania odpadów poprodukcyjnych w podłożu nieczynnego składowiska odpadów przy ul. Zielonej w granicach Z.Ch. ZACHEM S.A. w Bydgoszczy. Bydgoszcz (nie publikowane, archiwum RDOŚ Bydgoszcz)
2. Andrzejewski W., 2011 – Raport sozologiczny z analizą odpadów. Geoprogram, Bydgoszcz
3. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2005 – Aniline CAS #62-53-3. Division of Toxicology ToxFAQs™. Department of Health and Human Service Public Health Service. Atlanta, GA
4. ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2011 – ToxGuide™ for Phenol C₆H₆O. U.S. Department of Health and Human Service Public Health Service. Atlanta, GA
5. Avitabile G., 2009 – Phenolic resins. Chapter 4: <http://wpage.unina.it/avitabil/testi/PheForm.pdf> (dostęp 31.10.2014 r.)
6. Bogacka T., Makowski Z., Ceglarski R., 1996 – Rozkład chlorofenoli w środowisku wodnym. Rocz. Państw. Zakł. Hig. 47(2):181-195.
7. Boule P., Guyon C., Lemaire J., 1982 – Photochemistry and environment. IV. Photochemical behavior of monochlorophenols in dilute aqueous solution. Chemosphere. 11(12):1179-1188
8. CEP (Canadian Environmental Protection), Act. 1999 - Priority Substances List State Of The Science Report For Ethylene Glycol. Environment Canada. Health Canada, December 2000
9. Cherry J.A., Feenstra S., Mackay D.M., 1992 – Developing rational goals for in situ remedial technologies. Subsurface Restoration. Conference Proceedings. Third International Conference on Ground Water Quality Research. National Center for Ground Water Research, Dallas
10. Cohen R.M., Mercer J.W., Greenwald R.M., Beljin M.S., 1997 – Design Guidelines for conventional pump-and-treat systems. Report No. EPA/540/S-97/504, Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. EPA, Washington, D.C., U.S.A.
11. Czop M., 2010 – Hydrogeologiczny model numeryczny ZCh „Zachem” w Bydgoszczy [w:] Dodatek nr 2 do dokumentacji hydrogeologicznej określającej warunki hydrogeologiczne w rejonie Zakładów Chemicznych w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kielce
12. D’Oliveira J.C., Al-Sayyed G., Pichat P., 1990 – Photodegradation of 2- and 3-chlorophenol in TiO₂ aqueous suspension. Environ. Sci. Technol. 24(7):990-996
13. Dmitruk U., Zbieć E., Dojlido J., 2006 – Występowanie i oznaczanie chlorofenoli w środowisku wodnym. Ochrona Środowiska. Rok 28(3):25-28
14. Dmoch J., 1978 – Jura i kreda w rejonie Bydgoszczy. Kwart. Geol. T.22 nr 4
15. Dowgiałło (red.), 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Ministerstwo Środowiska. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
16. Eisenhauer H.R., 1963 – The ozonization of phenolic wastes. J. Water Pollut. Control Fed. 40(11):1887-1899
17. EPA (Environmental Protection Agency), 2000 – Preliminary Data Summary. Airport Deicing Operations (Revised). Washington D.C.
18. EPA (Environmental Protection Agency), 2005 - Waste from the Production Of Dyes and Pigments Listed as Hazardous. EPA530-F-05-004

19. Fert Z., Makarewicz B., 1988 - Badania petrograficzno – litologiczne osadów czwartorzędowych dla Szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000, ark. Bydgoszcz Wschód, Warszawa
20. Gałęcki J., 1964 – Preparatyka nieorganiczna. WNT, Warszawa. 755-757
21. Godsy E.M., Goerlitz D.F., Ehrlich G.G., 1983 – Methanogenesis of phenolic compounds by a bacterial consortium from a contaminated aquifer in St. Louis Park, Minnesota. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 30(3):261-268
22. Hem J.D., 1970 – Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, Geol. Surv. Wat. Supp. Pap. 1473
23. Holden J.M.W. (red.), 1998 – Hydraulic measures for the treatment and control of groundwater pollution. CIRIA Westminster (London)
24. Hwang H.M., Hodson R.E., Lee R.F., 1986 – Degradation of phenol and chlorophenols by sunlight and microbes in estuarine water. Environ. Sci. Technol. 20(10):1002-1007
25. INEOS Phenol. 2014 – Karta charakterystyki. Gladbeck
26. Kanno S., Nojima K., 1979 – Studies of photochemistry of aromatic hydrocarbons. V. Photochemical reaction of chlorobenzene with nitrogen oxides in air. Chemosphere. 8(4):225-232
27. Keith L.H., Walters D.B., 1992 – The National Toxicology Program's Chemical Data Compendium – Volume II. Chemical and Physical Properties. MI: Lewis Publishers, Chelsea
28. Kleczkowski A.S. Rózkowski A. (red.), 1997 – Słownik hydrogeologiczny. Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Wyd. TRIO, Warszawa
29. Kołodziejczyk A., 2011 – <http://www.chem.pg.gda.pl/Katedry/Organa/attachments/article/90-/9.%20Alkohole.doc> (dostęp 21.01.2015 r.)
30. Kondracki J., 2009 - Geografia regionalna Polski. PWN Warszawa
31. Koot C., Van der Wijk M., Stook P., Van der Pal J.C.N., 2011 – Natural capping of the landfill volgermeer polder [w:] (pod red.) Malina G.: Rekultywacja i rewitalizacja terenów zdegradowanych, Poznań
32. Kozerski B. (red). 2000 – Objasnienia do Mapy Hydrogeologicznej Polski 1:50 000. ark. Bydgoszcz Wschód (319), PIG Warszawa
33. Kozłowska M., Kozłowski I., 1992 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000. ark. Bydgoszcz Wschód (319). PIG, Warszawa
34. Lewandowski G., Milchert E., 2002 – Podstawy technologii produkcji fenolu i acetonu metodą kumenową. Cz. II. Utlenianie kumenu i rozkład wodoronadtleniu. Przemysł chemiczny. 81(2):103-105
35. Ligorati F., Sartorio E., 1980 - Process for the thermal decomposition of phenol pitch, US Patent 4339605 A
36. Loehr R.C., Matthews J.E., 1992 – Loss of organic chemicals in soil: pure compound treatability studies. J. Soil. Contam., 1(4):339-360
37. Lyons C.D., Katz S.E., Bartha R., 1985 – Fate of herbicide-derived aniline residues during ensilage. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 35(5):704-710
38. Macioszczyk A., 1987 – Hydrogeochemia. Wyd. Geol. Warszawa
39. Malina G., 2007 – Likwidacja zagrożenia środowiska gruntowo – wodnego na terenach zanieczyszczonych. Seria Monografie 132, Wyd. Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa
40. Montgomery J.H., 2000 – Groundwater chemicals desk reference 3rd edition. Lewis Publishers

41. Moza P.N., Fytianos, K., Samanidou, V., Korte, F.F., 1988 – Photodecomposition of chlorophenols in aqueous medium in presence of hydrogen peroxide. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 41(5):678-682
42. Narwojsz A., 1989 – Dokumentacja hydrogeologiczna badań migracji skażeń w rejonie ZCh „Organika – Zachem” w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Geologiczne w Warszawie, Zakład w Gdańsku, Gdańsk
43. Narwojsz A., 2001 – Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne w rejonie ul. Zielonej na terenie Zakładów Chemicznych ZACHEM w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne, Gdańsk
44. Narwojsz A., 2007 – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów ujęć wody podziemnej z utworów czwartorzędowych na terenie Zakładów Chemicznych w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne, Gdańsk
45. Narwojsz A., 2007 – Raport roczny z obserwacji i kontroli wód podziemnych (monitoringu lokalnego) w rejonie składowisk przy ul. Zielonej na terenie Zakładów Chemicznych w Bydgoszczy w roku 2007. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne Sp. z o.o., Gdańsk
46. Nielsen O.G., Haugen O.A., Zahlsen K., Halgunset J., Helseth A., Aarset H., Eide I., 1988 – Toxicity of n-C9 to n-C13 alkanes in the rat on short term inhalation. *Pharmacol. Toxicol.* 62(5):259-266
47. NRC (National Research Council), 1994 – Water Science and Technology Board. Alternatives for Ground Water Cleanup, Washington
48. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 19 kwietnia 2016 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2016 poz. 672)
49. Perelman A.J., 1971 – Geochemia krajobrazu. PWN Warszawa
50. Pietrucin D., 2015 - Migracja zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych w środowisku wodnym. na przykładzie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” w Zakładach Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy. Rozprawa doktorska, Kraków
51. Pillai P., Helligs C.S., Dragun J., 1982 – Soil-catalyzed oxidation of aniline. *Chemosphere.* 11(3):299-317
52. PN-ISO 14235:2003 – Jakość gleby. Oznaczanie zawartości węgla organicznego w glebie przez utlenianie dwuchromianem (VI) w środowisku kwasu siarkowego (VI)
53. PN-EN 12457-2:2006 – Charakteryzowanie odpadów. Wymywanie. Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów. Część 2: Jednostopniowe badanie porcjowe przy stosunku cieczy do fazy stałej 10L/kg w przypadku materiałów o wielkości cząstek poniżej 4 mm (bez redukcji lub z redukcją wielkości)
54. POŚ 2017, - Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 lutego 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo ochrony środowiska. Dz.U. 2017 poz. 519.
55. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 21 grudnia 2015 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych (Dz.U. 2016 poz. 85).
56. Smarzyński A., Sadowski O., 2005 – Ujęcie barierowe jako element systemu przejmującego zanieczyszczone wody gruntowe z rejonu składowisk przy ul. Zielonej w Bydgoszczy. Hydrogeologia Kujaw i Dolnego Powiśla. Przewodnik Sesji terenowych, Toruń

57. Smith L.R., Rosazza J.P., 1974 – Degradation of volatile chlorinated aliphatic priority pollutants in groundwater. *Environ. Int.*, 19(4):291-298
58. Sorensen O., 1985 - Spurenanalyse von Chlorphenolen in Trinkwasser. *Vom Wasser*: 51. 259 RTECS
59. Takahashi H., 1990 – Ozonation of several organic compounds having low molecular weight under ultraviolet irradiation. *Ozone Sci. Eng.* 12(1): 1-18
60. Technologia, 1993 – Technologia utylizacji wód z ujęcia „barierowego”. Praca badawcza zespołu Wydziału Badawczego Zakładów Chemicznych „Organika – Zachem” w Bydgoszczy
61. Todd D.K., Mays L.W., 2005 – Groundwater Hydrogeology. Third Edition. Wiley. USA
62. Ułanowicz M., 1992 – Dokumentacja hydrogeologiczna i projekt badań hydrogeologicznych ujęcia barierowego Zakładów Chemicznych w Bydgoszczy przy ul. Płątnowskiej. Przedsiębiorstwo Geologiczne Zakład w Gdańsku, Gdańsk
63. Vainshav D.D., Babeu L., 1987 – Comparison of occurrence and rates of chemical biodegradation in natural waters. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 39(2): 237 – 244
64. WHO (World Health Organization), 2000 - Concise International Chemical Assessment Document 22. Ethylene Glycol: Environmental aspects. Geneva
65. Windholz M., 1976 – The Merck index: An encyclopedia of chemicals and drugs. 9th ed. Merck
66. WIOŚ (Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska), 2015 – Raport o stanie środowiska w województwie kujawsko-pomorskim w 2014 roku. Inspekcja Ochrony Środowiska Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Bydgoszczy. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Bydgoszcz
67. WS Atkins. 2007 – Wniosek o uzgodnienie warunków przeprowadzenia działań naprawczych środowiska gruntowo – wodnego w rejonie ul. Zielonej na terenie ZACHEM S.A. w Bydgoszczy. WS Atkins – Polska Sp. z o.o., Warszawa
68. Young W.F., Horth, H., Crane, R., Ogden, T., Arnott, M., 1996 – Taste and odour threshold concentration of potential potable water contaminants. *Water Res.* 30(2):331-340
69. Zachem, 1991 – Protokół z inwentaryzacji odpadów nagromadzonych w składowiskach Z.Ch. „Organika – Zachem”. Bydgoszcz
70. Zaleski A., 1997 – Aneks do dokumentacji hydrogeologicznej ujęcia wód podziemnych z utworów czwartorzędowych – wykonanie otworu zastępczego A1 oraz likwidacja studni A na terenie ujęcia „barierowego” Zakładów Chemicznych „Organika – Zachem” przy ul. Płątnowskiej w Bydgoszczy. Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne Sp. z o.o. w Gdańsku. Gdańsk

Strony internetowe:

- <https://pl.climate-data.org/location/710/>: *World Map of Köppen–Geiger Climate Classification (ang.)* [dostęp 04.06.2017].
- mapy.geoportal.gov.pl [dostęp 08.09.2017].

Spis rysunków

Rys. 1. Lokalizacja składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	10
Rys. 2. Struktura składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	11
Rys. 3. Zasięg występowania zanieczyszczeń w obrębie środowiska gruntowo-wodnego w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	12
Rys. 4. Formy ochrony przyrody w rejonie składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	20
Rys. 5. Wykres klimatyczny miasta Bydgoszczy (źródło: https://pl.climate-data.org/location/710/)	24
Rys. 6. Syntetyczny profil geologiczny rejonu Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy (Pietrucin, 2015 na podstawie Kozłowska, 1992).....	30
Rys. 7. Syntetyczny profil geologiczny utworów czwartorzędowych rejonu Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy (Pietrucin, 2015 na podstawie Kozłowska, 1992)	31
Rys. 8. Przekrój geologiczny w rejonie Zakładów Chemicznych „Zachem” w Bydgoszczy (Pietrucin, 2015 na podstawie Kozłowska, 1992).....	33
Rys. 9. Lokalizacja składowiska „Zielona” oraz elementów instalacji wykonanych w celu ograniczania rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia, przedstawiona na ortofotomapie	37
Rys. 10. Model konceptualny budowy geologicznej w rejonie składowiska „Zielona”	43
Rys. 11. Wynikowa mapa czwartorzędowego piętra wodonośnego w rejonie składowiska odpadów „Zielona”	46
Rys. 12. (a) Wykres i statystyki modelu hydrogeologicznego w rejonie składowiska „Zielona” oraz (b) histogram rozkładu odchyleń pomiędzy wartościami obliczonymi na modelu a zmierzonymi w piezometrach w rejonie składowiska „Zielona”	47
Rys. 13. Rozkład stężeń Cl^- (a) oraz Na^+ (b) w rejonie składowiska „Zielona”	58
Rys. 14. Rozkład stężeń Fe (a) oraz Br^- (b) w [mg/L] w rejonie składowiska „Zielona”	59
Rys. 15. Rozkład stężeń TOC (a) oraz fenolu (b) w [mg/L] w rejonie składowiska „Zielona”	61
Rys. 16. Rozkłady stężeń chloroaniliny (izolinie [$\mu\text{g/L}$]) i aniliny (punktowo) (a) oraz toluidyny [mg/L] (b) w rejonie składowiska „Zielona”	62
Rys. 17. Rozkład stężeń oktylofenolu i estrów oktylofenolooksyetylowych (a) oraz hydroksybifenylu (b) w [mg/L] w rejonie składowiska „Zielona”	62
Rys. 18. Mapa migracji chlorków (Cl^-) w rejonie składowiska odpadów „Zielona”	65
Rys. 19. Mapa migracji sodu (Na^+) w rejonie składowiska odpadów „Zielona”	66
Rys. 20. Mapa migracji fenolu w rejonie składowiska odpadów „Zielona”	67
Rys. 21. Parametry fizykochemiczne w eluatach przy L/S = 10 na składowisku „Zielona” (Pietrucin, 2015).....	69
Rys. 22. Ilości zanieczyszczonych wód podziemnych odpompowanych z poszczególnych studni ujęcia barierowego w latach 2000-2014.....	73
Rys. 23. Masa usuniętego ładunku substancji nieorganicznych ze studni A ₁ ujęcia barierowego	75
Rys. 24. Masa usuniętego ładunku substancji nieorganicznych ze studni C ujęcia barierowego	75
Rys. 25. Masa usuniętego ładunku substancji organicznych ze studni A ₁ ujęcia barierowego	76
Rys. 26. Masa usuniętego ładunku substancji organicznych ze studni C ujęcia barierowego.....	76
Rys. 27. Schemat wariantu nr 1 technologicznej koncepcji remediacji obszaru	78
Rys. 28. Typowy skutek metody pump-and-treat zanieczyszczonych wód podziemnych (Holden i in., 1998).....	79
Rys. 29. Schemat wariantu nr 2 technologicznej koncepcji remediacji obszaru	81
Rys. 30. Schemat wariantu nr 3 technologicznej koncepcji remediacji obszaru	83

Rys. 31. Schemat wariantu nr 4 technologicznej koncepcji remediacji obszaru	84
Rys. 32. Harmonogram czasowy realizacji poszczególnych wariantów remediacyjnych (<i>w latach</i>) .	88
Rys. 33. Diagram identyfikacji optymalnego, rekomendowanego do zastosowania wariantu remediacji	95
Rys. 34. Schemat ideowy instalacji remediacyjnej środowiska gruntowo-wodnego	98
Rys. 35. Schemat ideowy dedykowanej jednostki podczyszczania wód podziemnych	99
Rys. 36. Proponowana konfiguracja panelu remediacyjnego dla etapu I projektu oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego dla składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz ze strefą jego oddziaływania	100
Rys. 37. Harmonogram optymalnych wariantów remediacji dla składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” wraz z obszarem jego oddziaływania na środowisko gruntowo-wodne	108

Spis fotografii

Fot. 1. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” – część ISO	16
Fot. 2. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” w Bydgoszczy – miejsce nielegalnej depozycji szlamu posolankowego, stan na 8.05.17	18
Fot. 3. Składowisko odpadów przemysłowych „Zielona” w Bydgoszczy – miejsce nielegalnej depozycji szlamu posolankowego, stan na 8.05.17	19
Fot. 4. Grunt zanieczyszczony fenolem w rejonie składowiska „Zielona”	68
Fot. 5. Zrekrystalizowany siarczyn sodowy silnie zanieczyszczony fenolem	70

Spis tabel

Tab. 1. Wykaz działek ewidencyjnych w obrębie terenu wymagającego remediacji w związku z zanieczyszczeniem środowiska gruntowo-wodnego	12
Tab. 2. Inwentaryzacja odpadów wywiezionych ze składowiska „Zielona” (<i>Zachem, 1991</i>)	16
Tab. 3. Parametry techniczne studni ujęcia barierowego na rok 2005 (<i>Smarzyński, 2005</i>)	38
Tab. 4. Otwory piezometryczne poddane badaniom monitoringowym w latach 2012-2015 oraz w czerwcu 2017	44
Tab. 5. Parametry wykorzystane w modelu hydrogeologicznym w rejonie składowiska	45
Tab. 6. Stężenia Cl ⁻ , Na ⁺ i fenolu w [mg/L], wykorzystane na etapie kalibracji i weryfikacji modeli migracji zanieczyszczeń w rejonie składowiska „Zielona”	63
Tab. 7. Porównanie kosztów na realizację poszczególnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [mln zł]	87
Tab. 8. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 1 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska	89
Tab. 9. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 2 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska	90
Tab. 10. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 3 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska	90

Tab. 11. Kalkulacja kosztów realizacji wariantu nr 4 w zakresie likwidacji lub unieszkodliwienia składowiska	91
Tab. 12. Wykaz elementów technicznych do realizacji w poszczególnych wariantach systemu remediacji środowiska gruntowo-wodnego.....	91
Tab. 13. Porównanie kosztów na realizację poszczególnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [zł]	91
Tab. 14. Porównanie kosztów na realizację poszczególnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [zł]	92
Tab. 15. Kryteria oceny punktowej w procedurze wyboru optymalnej metody remediacji	93
Tab. 16. Kategoryzacja wyników oceny wariantów remediacji środowiska gruntowo-wodnego	94
Tab. 17. Ocena wariantów koncepcyjnych remediacji rejonu składowiska odpadów przemysłowych „Zielona”	94
Tab. 18. Poziomy stężenia zanieczyszczeń wskaźnikowych koniecznych do uzyskania w ramach remediacji	102
Tab. 19. Porównanie kosztów na realizację optymalnych wariantów remediacji składowiska odpadów przemysłowych „Zielona” oraz obszaru jego oddziaływania [mln zł]	109