



OCENA SKUTKÓW UWOLNIEŃ SUBSTANCJI TOKSYCZNYCH W PRZEMYSŁE

Narzędzia, jakimi posługuje się współczesna inżynieria bezpieczeństwa opracowane zostały na bazie najnowszych osiągnięć nauki oraz opartych o nie technologii. Ich wykorzystanie pozwala w sposób wiarygodny i terminowy zarządzać bezpieczeństwem społeczności lokalnych. Zadanie to jest jednak bardzo skomplikowane, ponieważ dynamiczny rozwój cywilizacyjny, w tym również znaczna ekspansja przemysłu generuje nowe zagrożenia, związane z substancjami niebezpiecznymi, których prawdopodobieństwo wystąpienia jest wprawdzie niskie, ale skutki powstałe w ich wyniku mogą być bardzo duże.

W rozumieniu ustawy z dnia 11 stycznia 2001 r. o substancjach i preparatach chemicznych (Dz.U. z 2006 r. Nr 129, poz. 902 z późn.zm.) jako niebezpieczne ocenia się substancje i preparaty zaklasyfikowane, co najmniej do jednej z poniższych kategorii: o właściwościach wybuchowych, o właściwościach utleniających, skrajnie łatwo palne, wysoce łatwo palne, łatwo palne, bardzo toksyczne, toksyczne, szkodliwe, żrące, drażniące, uczulające, rakotwórcze, mutagenne, działające szkodliwie na rozrodczość, niebezpieczne dla środowiska. Klasyfikacje przeprowadza się w celu określenia wszystkich właściwości substancji i preparatów, które mogą stwarzać zagrożenie w czasie normalnego ich stosowania lub użytkowania.

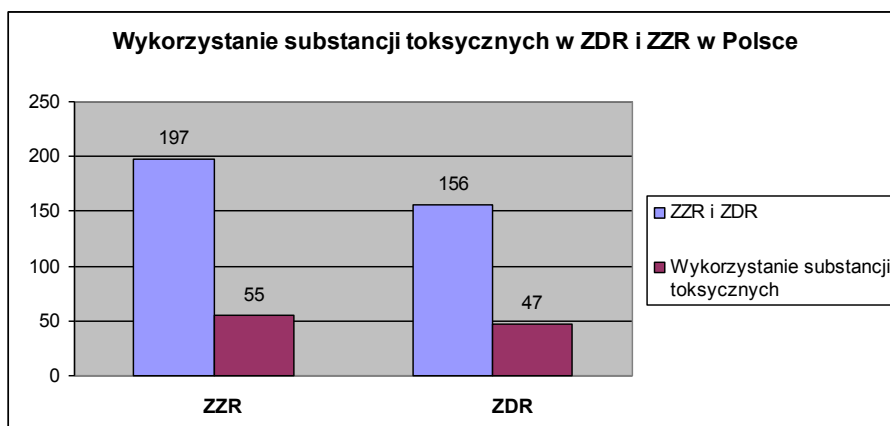
Substancjom i preparatom należącym do określonych kategorii niebezpieczeństwa przypisuje się znaki ostrzegawcze, które umieszcza się na opakowaniach, oraz symbole określające zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi oraz dla środowiska (Rysunek 1).

Znak ostrzegawczy	Symbol	Napis określający znaczenie znaku ostrzegawczego
	T+	Produkt bardzo toksyczny
	T	Produkt toksyczny

Rysunek 1. Wzory znaków ostrzegawczych oraz napisy określające ich znaczenie i symbole ¹.

W Polsce funkcjonuje wiele zakładów i innych jednostek organizacyjnych, w których przetwarzane, produkowane, magazynowane są substancje niebezpieczne. Według danych pochodzących z Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej na rok 2006 r. aż 156 zakładów funkcjonujących na terenie Polski zaliczanych jest do grupy dużego ryzyka (ZDR), a 197 do grupy zwiększonego ryzyka (ZZR), co łącznie daje 353 zakłady stwarzające ryzyko powstania poważnej awarii przemysłowej. Analiza danych zamieszczonych w ww. bazie danych pozwala stwierdzić, że aż 102 (47 ZDR i 55 ZZR) z nich wykorzystuje (przetwarza, produkuje, magazynuje) substancje o właściwościach toksycznych. Stanowi to, aż 29 % wszystkich zakładów (Rysunek 2).

¹ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 września 2003 r. w sprawie kryteriów i sposobu klasyfikacji substancji i preparatów chemicznych (Dz. U. Nr 171, poz. 1666 z późn. zm.).



Rysunek 2. Wykorzystanie substancji toksycznych w ZDR i ZZR w Polsce ².

Podstawowymi źródłami informacji o zaistniałych awariach z udziałem substancji niebezpiecznych są profesjonalne bazy danych takie jak: MHIDAS (ang. *Major Hazard Incident Data Service*)³. Ponadto szereg najnowszych danych nt. zdarzeń z udziałem substancji niebezpiecznych, które miały miejsce na terenie Polski dostarczają raporty i rejestry poważnych awarii opracowywane przez Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (dostępne na www.gios.gov.pl). Zestawienie poważnych awarii, jakie miały miejsce na terenie całego kraju w latach 2002-2005 r. oraz w I połowie 2006 r. ilustruje Tabela 1.

Tabela 1. Wykaz poważnych awarii w latach 2002-2005 i w I półroczu 2006r ⁴.

WYSZCZEGÓLNIENIE	2002	2003	2004	2005	2002-2005	2006 (I półrocze)
Łączna liczba poważnych awarii	164	145	150	150	609	90
Awarie z udziałem substancji toksycznych	0	7	2	2	14	3
<i>Ilość zdarzeń ze względu na miejsce wystąpienia</i>						
Transport	86	62	65	60	273	29
- drogowy	48	40	48	37	173	22
- rurociągowy	27	11	13	16	100	5
- kolejowy	8	6	3	6	23	2
- wodny	3	5	1	1	10	0
Zakłady	57	60	64	73	254	42
- przemysłowe	27	37	37	34	135	19
ZDR	brak danych	10	11	4	brak danych	7
ZZR	brak danych	1	4	3	brak danych	5
Mogące być źródłem awarii	brak danych	26	22	27	brak danych	30
- handlowe	21	9	18	23	71	20
- użyteczności publicznej	9	14	9	16	48	3
Inne	21	23	21	17	82	19

² Opracowanie własne na podstawie Wykazu zakładów kwalifikowanych do grupy dużego i zwiększonego ryzyka wystąpienia poważnej awarii przemysłowej według województw, Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej.

³ <http://www.hse.gov.uk/infoserv/mhidas.htm>

⁴ Opracowanie własne na podstawie informacji dostępnych na stronie www.gios.gov.pl.

Analiza zdarzeń określanych jako poważna awaria w latach 2002 – 2005 prowadzi do następujących wniosków. Spośród 609 awarii, do których doszło na terenie całego kraju, w 14 z nich uczestniczyły substancje i preparaty toksyczne.

Badania wskazują, że największa ilość zdarzeń z udziałem substancji niebezpiecznych miała miejsce bądź to w transporcie bądź w zakładach przemysłowych, które przetwarzały, produkowały, lub magazynowały substancje niebezpieczne. Analiza dotychczas zaistniałych awarii i katastrof pozwala dostrzec te krytyczne punkty procesu, które często są niezauważane w trakcie etapu ich projektowania.

Wielkość i rodzaj skutków powstałych na drodze oddziaływania substancji toksycznych na człowieka i środowisko zależy od wielu czynników. Mnogość ponoszonych skutków zdrowotnych, różnorodności populacyjne ludzi, brak pełnych danych o potencjalnych skutkach toksycznych dla wielu obecnych i stosowanych substancji chemicznych w znacznym stopniu ograniczają możliwość precyzyjnego określenia szczegółów, dotyczących wpływu substancji chemicznych na zdrowie ludzi. Ponadto wiele ekotoksyn wywołuje reakcje nieswoiste, a skutki ich oddziaływania pojawiają się na ogół dopiero po dłuższym czasie. Należy również uwzględnić powstawanie efektów niezależnych, sumujących, synergicznych lub antagonistycznych w przypadku uwolnienia kilku substancji.

Każde przekroczenie norm higienicznych stwarza ryzyko dla życia i zdrowia człowieka oraz zagrożenia dla środowiska. Analiza efektów fizycznych i potencjalnych skutków opiera się przede wszystkim na określeniu toksyczności substancji chemicznej. W celu zapewnienia odpowiednich warunków ochrony konieczne jest, zatem zastosowanie dopuszczalnych poziomów narażenia na substancje chemiczne w środowisku, czyli tzw. stężeń granicznych wyrażonych za pomocą dawki.

Dla oszacowania bardziej odległych skutków toksycznych substancji wykorzystuje się tak zwane wskaźniki ERPG⁵ opracowane przez AIHA⁶ stosowane w obliczeniach dotyczących skutków rozprzestrzeniania się substancji niebezpiecznych w wyniku awarii. Wskaźnik ERPG to maksymalne stężenie substancji niebezpiecznej skażającej powietrze, poniżej którego prawie każda osoba ekspozycja przez czas do 1 godziny, nie doznaje określonych negatywnych skutków zdrowotnych. Rozróżnia się trzy wskaźniki ERPG, definiowane następująco:

- Wskaźnik **ERG-3** odpowiada wartości stężenia powodującego poważne skutki zdrowotne, a nawet zagrożenie życia;
- Wskaźnik **ERG-2** odpowiada wartości stężenia powodującego nieodwracalne, lub inne poważne skutki dla zdrowia, lub wywołującego symptomy, które mogłyby osłabić zdolność do indywidualnej ochrony przed zagrożeniem;
- Wskaźnik **ERG-1** odpowiada wartości stężenia wywołującego odwracalne skutki uboczne, lub powodującego tylko przemijający nieprzyjemny zapach.

Wskaźniki te uwzględniają zarówno obecność szczególnie wrażliwej części populacji, jak i pewne niepewności związane z oddziaływaniem substancji toksycznych na życie i zdrowie człowieka. Operowanie wskaźnikami ERPG pozwala na wyznaczenie stref o określonym promieniu od źródła uwolnienia. Wskaźnik ERPG-3 charakteryzują najpoważniejsze skutki, a wyznaczona w oparciu o jego wartość strefa znajduje się najbliżej źródła uwolnienia. Kolejne strefy, odpowiadające wskaźnikom ERPG-2 oraz ERPG-1 charakteryzują mniejsze stężenia, a co za tym idzie, granice tych stref znajdują się w większej odległości od miejsca awarii. W obrębie tych stref oddziaływanie substancji toksycznej wywołuje określone skutki, a służby ratownicze zmusza do podjęcia działań zgodnych z procedurami ratowniczymi.

⁵ z ang. Emergency Response Planning Guidelines.

⁶ American Industrial Hygiene Association.

W odniesieniu do bezpieczeństwa życia i zdrowia ludzi narażonych na oddziaływanie niebezpiecznych substancji chemicznych celowe jest zastosowanie bardziej wygórowanych standardów higienicznych stosowanych na stanowisku pracy. Do standardów powszechnie stosowanych w Polsce⁷ w odniesieniu do ekspozycji długiej, powtarzanej z dnia na dzień należą: *najwyższe dopuszczalne stężenie* (NDS), *najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe* (NDSCh), *najwyższe dopuszczalne stężenie pułapowe* (NDSP)⁸.

Czynniki wpływające na rozprzestrzenianie się substancji toksycznych w atmosferze

Transport i dyspersja w atmosferze chmur gazowych, par i aerozoli o właściwościach toksycznych w istotny sposób zależy od charakterystyki źródła uwolnienia, czyli od warunków emisji, czynników atmosferycznych oraz czynników topograficznych.

Charakterystyka źródła emisji określa:

- geometrię źródła,
- sposób rozszczelnienia zbiornika,
- położenie i wysokość źródła emisji,

Do głównych czynników atmosferycznych należą:

- wiatr,
- turbulencja i dyfuzja atmosfery,
- stabilność atmosfery,
- prądy powietrzne,
- wymywanie zanieczyszczeń przez opady atmosferyczne.

W grupie czynników topograficznych wymienić należy:

- rzeźbę terenu, rodzaj zabudowy i inne zawady przestrzenne,
- stopień szorstkości podłoża,
- pochłanianie zanieczyszczeń przez podłoże.

Modelowanie rozprzestrzeniania się substancji niebezpiecznych w atmosferze wymaga rzetelnej analizy wymienionych wyżej czynników. Precyzyjne określenie warunków emisji, czynników atmosferycznych i topograficznych decyduje o dokładności i wiarygodności zastosowanego modelu dyspersji.

W celu obliczenia rozkładu stężeń gazu w środowisku stosuje się różne modele dyspersji:

1. Modele wynikające z zachowania się chmury gazowej:

- dyspersję gazu neutralnego,
- dyspersję gazu ciężkiego,
- dyspersję gazu unoszącego się.

2. Modele oparte o czas wypływu:

- modele dyspersji ciągłej,
- modele dyspersji chwilowej.

3. Modele oparte o numeryczne metody rozwiązywania równań z zakresu dynamiki płynów, głównie równania Eulera oraz Naviera-Stokesa.

Niektóre z nich można obliczyć na podręcznym kalkulatorze, inne, bardziej złożone, oparte są o zaawansowane symulacje komputerowe, do których wykorzystuje się kody obliczeniowe w oparciu o

⁷ Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 26 września 1997r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. z 2003 r., Nr 169, poz.1650 z późn.zm.).

⁸ Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. Nr 217, poz. 1833).

CFD⁹. Wszystkie one dostarczają wyników odpowiednio do różnych wariantów transportu i przemian chemicznych. Przy wyborze modelu dyspersji danej substancji niebezpiecznej w środowisku należy wziąć pod uwagę warunki, w jakich dana substancja została uwolniona, jej właściwości fizykochemiczne, medium transportujące, chemiczne i fizyczne zmiany w trakcie transportu, dostosowanie informacji uzyskiwanych na podstawie modelu do potrzeb oraz możliwości wykonania.

Programy komputerowe do modelowania skutków uwolnień toksycznych

Istnieje wiele programów komputerowych modelujących rozprzestrzenianie się substancji toksycznych. Wśród programów możliwych do wykorzystania w omawianym zakresie wymienić należy m. in. PHAST Professional, EFFECTS, TRACE oraz ALOHA, będący częścią programu CAMEO. Programy te służą przede wszystkim do wykonania analizy efektów fizycznych i skutków reprezentatywnych zdarzeń awaryjnych (RZA) dla potrzeb raportów o bezpieczeństwie oraz ilościowych analiz ryzyka. Zastosowanie jednego z wyżej wymienionych programów zależy od obranego celu oraz przyjętych założeń.

Program ALOHA opracowany został przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska EPA (ang. *Environmental Protection Agency*)¹⁰, na czele której stoi Administrator mianowany przez Prezydenta USA. Od 1970 r. EPA realizuje zadania mające na celu ochronę życia, zdrowia i środowiska.

ALOHA pozwala modelować uwolnienia substancji znajdujących się w bazie danych o substancjach, w którą wyposażony jest program. W bazie substancji programu ALOHA znajduje się ponad 60 substancji i związków chemicznych. Istnieje również możliwość dodania do bazy substancji, która nie została umieszczona we wspomnianym wyżej wykazie. Dodatkowym atutem jest konwersja jednostek na układ SI, powszechnie obowiązujący w Polsce. Wszystkie opisane powyżej charakterystyki programu ALOHA dają podstawę do powszechnego wykorzystania go w charakterze narzędzia do wspomagania decyzji w sytuacjach awaryjnych.

Podobnie jak w przypadku pozostałych programów, dokładność ALOHA zależy od stopnia sprecyzowania danych wprowadzanych do programu przez użytkownika. Niezależnie jednak od dokładności wprowadzonych danych w pewnych sytuacjach ALOHA może być zawodny, ponieważ nie modeluje niektórych rodzajów uwolnień.

Analiza przy użyciu programu ALOHA

W dalszej części artykułu, przy pomocy programu ALOHA, analizie poddane zostanie reprezentatywne zdarzenie awaryjne dotyczące uwolnienia chloru podczas wypadku autocysterny.

Wymienione powyżej zdarzenie awaryjne stanowi podstawę do opracowania scenariusza uwolnienia się analizowanej substancji toksycznej. Scenariusz ten to nic innego jak mechanizm powstawania ciągów zdarzeń awaryjnych rozpoczynających się od zdarzeń krytycznych, aż do konkretnych skutków zagrożeń chemicznych. Aby móc określić taki mechanizm konieczne jest określenie rozwoju zdarzenia względem systemów bezpieczeństwa.

Autorzy niniejszego artykułu zakładają, że wybrane do analizy zdarzenie miało miejsce na terenie m.st. Warszawy. Brak obwodnicy w Warszawie powoduje, że transport substancji niebezpiecznych odbywa się głównymi ulicami, gdzie panuje wzmożony ruch i istnieje duże niebezpieczeństwo wystąpienia awarii pojazdu przewożącego towar niebezpieczny lub wystąpienia katastrofy komunikacyjnej z jego udziałem.

⁹ CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) – Numeryczna Dynamika Płynów.

¹⁰ www.epa.gov

Najczęściej przewożonymi na terenie Warszawy substancjami są: chlor (446 ton/rok), alkohol etylowy (82,5 tony/rok), wodorotlenek sodu (23 tony/rok), żelazokrzem (22 tony/rok), azotan potasowy (20 ton/rok), amoniak (2,2 tony/rok), dimetyloaminy (2,6 tony/rok)¹¹. Trasy dowozu do odbiorców około 60 magazynujących i wykorzystujących te materiały, biegną głównymi ulicami Warszawy: Aleją Solidarności, Czerniakowską, Towarową. Stwarza to tym większe zagrożenie dla ludzi i środowiska, że chlor jest substancją toksyczną. Ilość i trasy legalnych przewozów towarów niebezpiecznych podlegają kontroli, ale znaczna część substancji stwarzających zagrożenie dla życia, zdrowia i środowiska przewożona jest w sposób nielegalny i niemonitorowany.

Poniżej przedstawione zostaną założenia i treści scenariusza awaryjnego przyjętego przez autorów niniejszego artykułu.

Scenariusz nr 1

W sobotni poranek na skrzyżowaniu Al. Jerozolimskiej z ulicą Towarową ma miejsce wypadek samochodowy. Dochodzi do zderzenia dwóch pojazdów: autocysterny przewożącej ok. 30 ton ciekłego chloru oraz samochodu osobowego, który nie zachował zasad przepisów ruchu drogowego. W wyniku kolizji uszkodzona zostaje cysterna, czego efektem jest uwolnienie się znacznej zawartości zbiornika autocysterny do atmosfery. Uwolnienie chloru ze zbiornika pod ciśnieniem jest książkowym przykładem zdarzenia awaryjnego z udziałem substancji toksycznej, a wypadek autocysterny i uwolnienie chloru do otoczenia jest bardzo prawdopodobne.

Informacje o substancji:

Chlor Cl_2 jest żółto-zielonym gazem około półtora raza cięższym od powietrza, o nieprzyjemnym, duszącym zapachu, silnie trujący. Chlor jest bardzo aktywny chemicznie. Gazowy chlor działa drażniąco na układ oddechowy i błony śluzowe. Może prowadzić do obrzęku płuc, a w dużych stężeniach do śmierci. W powietrzu jest wyczuwalny przy stężeniu 5 mg/m^3 (3,5 ppm), ale stężenie niebezpieczne to 1450 mg/m^3 (1000 ppm). Wartość średnia ważona dopuszczalna w długim przedziale czasu (8 godzin na dzień) nie powinna przekroczyć $0,73 \text{ mg/m}^3$ (0,5 ppm).

Warunki emisji:

W zbiorniku znajdowało się 30 ton ciekłego chloru (do otoczenia wydostało się 20 ton), temperatura panująca wewnątrz zbiornika to 10°C , chlor wydostawał się na zewnątrz przez otwór o średnicy 2 cm znajdujący się na wysokości 60 cm od dna zbiornika.

Dane meteorologiczne:

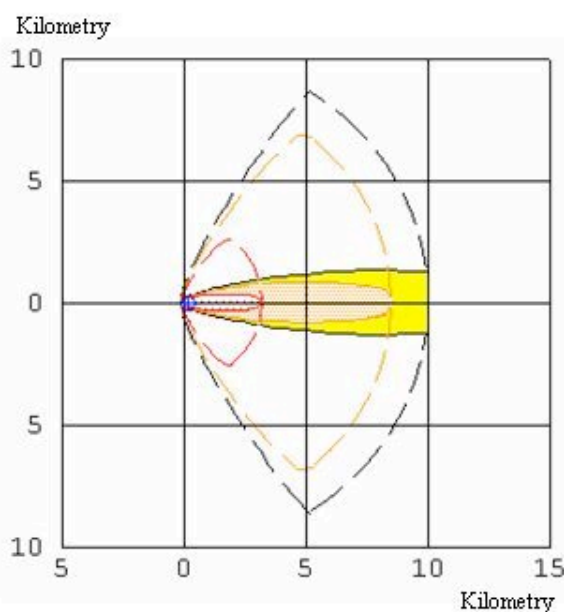
Założenia dotyczące warunków meteorologicznych opierają się o uwarunkowania przyrodnicze charakterystyczne dla Warszawy: wiatr Pn-Zach o prędkości 2 m/s (najbardziej niekorzystne warunki termiczne), temperatura powietrza: 25°C (zdarzenie ma miejsce w okresie letnim), względna wilgotność: 50%.

Analiza efektów fizycznych dla przedstawionego przypadku polega na obliczeniu zasięgu chmury toksycznej o stężeniu przekraczającym wartość progową. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu programu komputerowego ALOHA i zamieszczone w dalszej części artykułu. Na podstawie wprowadzonych do programu danych oraz przyjętych założeń dokonano analizy skutków powstałych w efekcie uwolnienia do otoczenia 20 ton chloru.

1. Wokół źródła uwolnienia wyznaczone zostały odległości rozprzestrzeniania się chmury toksycznej w zależności od wskaźnika ERPG. Położenie stref wzdłuż kierunku wiatru przedstawiają Rysunki 3 i 4 oraz Tabela 2.. Obrazują one następujące odległości i możliwe do wystąpienia skutki:

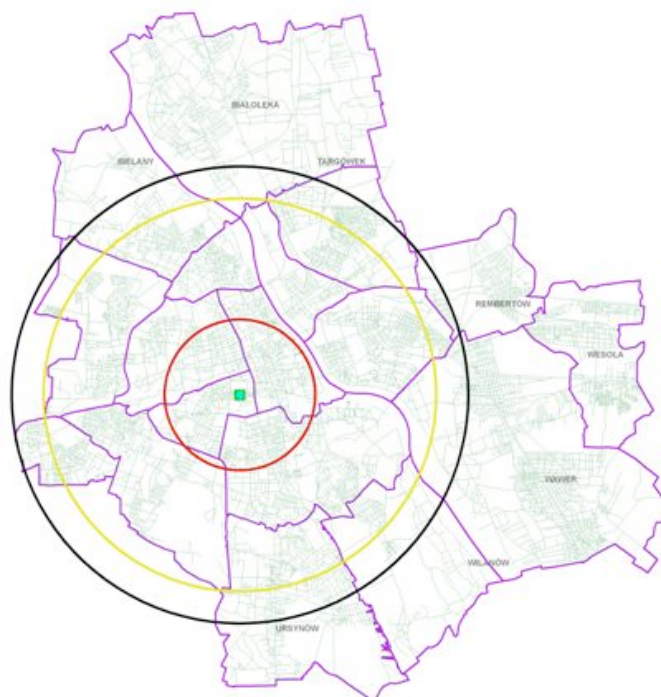
¹¹ Dane dot. przewozów rocznych z Komendy Miejskiej Państwowej Straży Pożarnej w Warszawie.

- Strefa ERPG-3 odpowiadająca stężeniu o wartości 20 mg/m³ znajduje się w promieniu do 3,3 km. Prawie wszyscy ludzie znajdujący się w tej strefie mogą być wystawieni na działanie chloru przez okres powyżej jednej godziny eksponowani są na stężenie powodujące poważne skutki zdrowotne, a nawet zagrożenie życia;
- Strefa ERPG-2 odpowiadająca stężeniu o wartości 2 mg/m³ znajduje się w promieniu od 3,3 m do 8,6 km od źródła uwolnienia. Dla czasu powyżej jednej godziny strefę tą charakteryzują nieodwracalne, lub inne poważne skutki dla zdrowia lub symptomy mogące osłabić zdolność do indywidualnej ochrony przed zagrożeniem;
- Strefa ERPG-1 odpowiadająca stężeniu o wartości 1 mg/m³ znajduje się w odległości od 8,6 m do 10 km. Prawie wszyscy ludzie znajdujący się w tej strefie mogą być wystawieni na działanie chloru przez okres jednej godziny bez doznania żadnych skutków ubocznych, albo skutek ten będzie chwilowy dla zdrowia lub powodujący tylko przemijający nieprzyjemny zapach.



- ERPG-3 – do 1 godz. brak skutków zagrażających życiu
- ERPG-2 – do 1 godz. brak nieodwracalnych i poważnych skutków dla zdrowia lub symptomów, które mogłyby osłabić zdolność do normalnego działania
- ERPG-1 – do 1 godz. brak ubocznych skutków albo skutek chwilowy dla zdrowia
- Możliwa zmiana położenia strefy ERPG – 3
- Możliwa zmiana położenia strefy ERPG – 2
- Możliwa zmiana położenia strefy ERPG - 1

Rysunek 3. Zasięgi rozprzestrzeniania się toksycznej chmury chloru, obliczone w programie ALOHA.



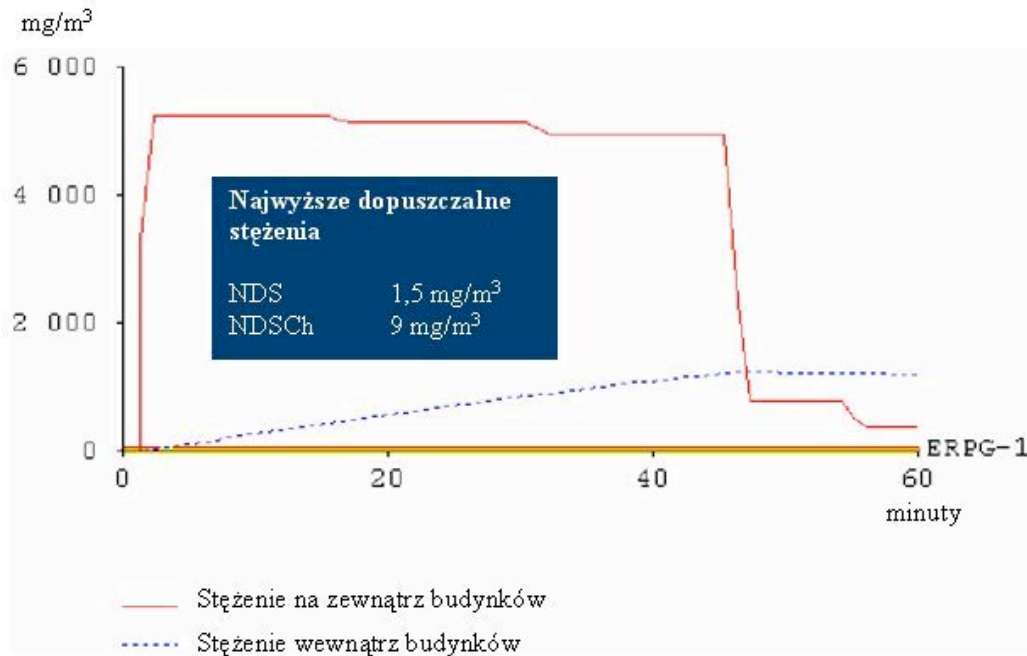
Rysunek 4. Zasięgi rozprzestrzeniania się toksycznej chmury chloru na mapie Warszawy, zgodnie z założeniami dla Scenariusza 1.

Tabela 2. Legenda do Rysunku 4.

Strefa	Odległość od źródła	Prawdopodobne skutki	Szacowana liczba ludności w danej strefie (brak szczegółowych danych)	Strategiczne obiekty
ERPG-3	do 3,3 km	Poważne skutki zdrowotne, zagrożenie życia	Dzielnice: Śródmieście, Wola, Ochota, Mokotów	Szpital, urząd miasta, szkoły., przedszkola, kina, teatry, centra handlowe
ERPG-2	od 3,3 m do 8,6 km	Nieodwracalne, lub inne poważne skutki dla zdrowia, symptomy, które mogłyby osłabić zdolność do indywidualnej ochrony przed zagrożeniem	Dzielnice: Śródmieście, Wola, Ochota, Mokotów, Praga PN, Praga Pd, Włochy, Ursus, Ursynów, Bemowo, Białoleka, Rembertów, Wawer, Targówek	Szpital, urząd miasta, szkoły., przedszkola, kina, teatry, centra handlowe
ERPG-1	od 8,6 m do 10 km	Odwracalne skutki uboczne, lub przemijający nieprzyjemny zapach.	Dzielnice: Śródmieście, Wola, Ochota, Mokotów, Praga PN, Praga Pd, Włochy, Ursus, Ursynów, Bemowo, Białoleka, Rembertów, Wawer, Targówek	Szpital, urząd miasta, szkoły., przedszkola, kina, teatry. Centra handlowe

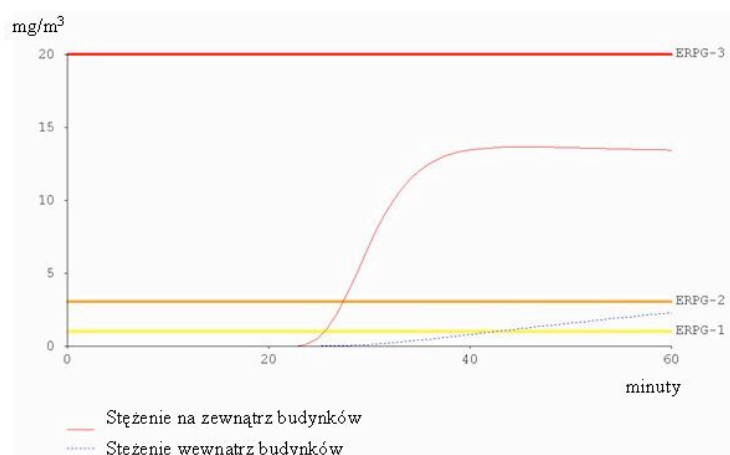
2. Maksymalna wartość stężenia na zewnątrz równa jest $4\ 570\ \text{mg/m}^3$ i utrzymuje się ona na tym poziomie przez około 18 minut, a następnie stopniowo maleje. Natomiast wewnątrz budynków znajdujących się w sąsiedztwie miejsca awarii stężenie rośnie liniowo i w około 50 minucie osiąga maksimum równe $1\ 230\ \text{mg/m}^3$. Należy również zauważyć, że stężenie na zewnątrz

przez niemal całą godzinę znacznie przewyższa wartość stężenia odpowiadająca, ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3, co dla ludności znajdujące się w obrębie stref wyznaczonych na Rysunkach 3 i 4, może oznaczać wystąpienie skutków opisanych w punkcie 1. Rozkład stężenia w czasie 60 minut po uwolnieniu ilustruje Rysunek 5.



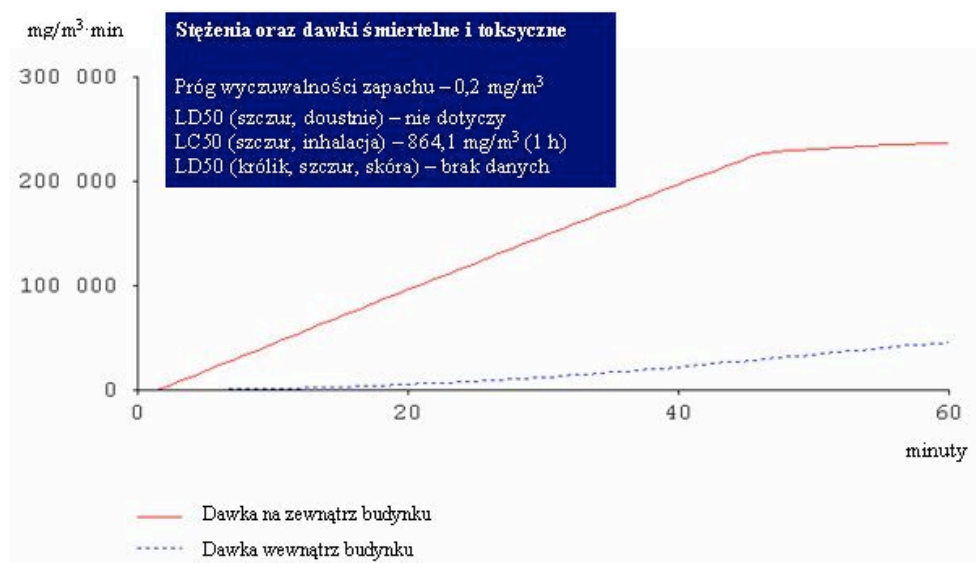
Rysunek 5. Rozkład stężenia w czasie 60 minut po uwolnieniu chloru w odległości 100 m, obliczony w programie ALOHA.

Ludzie będący w odległości, co najmniej 100 metrów od miejsca zdarzenia ekspozowani są na działanie stężenia o wartości znacznie przekraczającej NDSCl, które dla chloru wynosi 9 mg/m³. Zgodnie z definicją NDSCl utrzymanie się tej wartości w czasie dłuższym niż 15 minut powodować może ujemne zmiany w stanie zdrowia narażonej społeczności. Podobne wyniki dają obliczenia wykonane dla odległości odpowiadającej granicy strefy ERPG-3. Maksymalne stężenie na zewnątrz w odległości około 3 km od miejsca zdarzenia znacznie przekracza wartość NDS oraz NDSCl i wynosi 13,6 mg/m³ i utrzymuje się na tym poziomie przez około 20 minut (Rysunek 6).



Rysunek 6. Rozkład stężenia w czasie 60 minut po uwolnieniu chloru w odległości 3 km, obliczony w programie ALOHA.

3. Maksymalna dawka, na jaką narażona jest każda osoba znajdując się w odległości 100 metrów od miejsca uwolnienia chloru w ciągu pierwszej godziny, na zewnątrz wynosi 236 000 mg/m³·min, natomiast wewnątrz ma ona wartość równą 42 200 mg/m³·min. Należy zauważyć, że wartość ta rośnie od momentu uwolnienia chloru. Stężenie śmiertelne medialne (LC₅₀), które ustala się na podstawie stężenia substancji, która podana zwierzętom doświadczalnym inhalacyjnie przez 1 godzinę powoduje śmierć połowy zwierząt w badanej grupie, dla chloru ma wartość 864,1 mg/m³. W rozważanym przypadku dawka ta została przekroczona w około 3 minucie. Dużo większe szanse przetrwania mają zatem ludzie będący wewnątrz budynków choć z czasem i tam wartość ta jest znacznie wyższa, co obrazuje Rysunek 7.



Rysunek 7. Dawka toksyczna w odległości 100 m, obliczona w programie ALOHA.

Przedstawiony scenariusz stanowi książkowy przykład awaryjnego uwolnienia chloru podczas wypadku autocysterny. Mając na uwadze ilość uwolnionej substancji, czas oraz miejsce awarii, warunki meteorologiczne oraz jej własności fizykochemiczne, sugerując się wynikami analizy przeprowadzonej w programie ALOHA należy spodziewać się skutków o bardzo szerokiej skali. Fakt, że zdarzenie miało miejsce w sobotni poranek, znacznie zwiększa potencjalną liczbę ofiar.

Obserwując maksymalne zasięgi stref wyznaczonych w oparciu o wartości wskaźników ERPG można wyznaczonych potencjalną liczbę ofiar. Z danych dostępnych na stronie internetowej Urzędu m.st. Warszawy wynika, że w granicach strefy ERPG-1 znajduje się niemal cała Warszawa. Zagrożenie wydaje się być tym bardziej poważne, że jak podaje Lorenc H.M. miejsce zdarzenia znajduje się w pobliżu korytarza powietrznego stanowiącego podstawowy element systemu wymiany powietrza. Korytarz powietrzny Al. Jerozolimskich charakteryzuje się 85% stopniem efektywności wymiany powietrza. Oznacza to z jednej strony trudności w prognozowaniu przemieszczania się toksycznej chmury, z drugiej natomiast możliwość przemieszczenia jej na znaczną odległość od miejsca uwolnienia chloru.

Analiza wykonana w programie ALOHA pokazuje skalę potencjalnych skutków przy założeniu nie podjęcia działań ratowniczych. Wyniki analiz dają podstawę do dalszych decyzji dotyczących zakresu niezbędnych działań mających na celu zmniejszenie liczby ofiar i szkód powstałych na skutek uwolnienia do otoczenia toksycznej cieczy. Fakt ten wpisuje program ALOHA na listę narzędzi umożliwiających wspomaganie decyzji w sytuacjach noszących znamiona kryzysu. Decyzje dotyczące

zakresu niezbędnych działań z jednej strony opierać się powinny na przeprowadzonej uprzednio analizie skutków, z drugiej natomiast mieścić się w graniach obowiązującego prawa oraz opracowanych na ich podstawie procedur reagowania.

W ostatnich latach nastąpił znaczny wzrost ilości, różnorodności i złożoności procesów chemicznych wykorzystujących na szeroką skalę substancje toksyczne, palne i wybuchowe. Następstwem tego procesu, który jak należy się spodziewać, będzie postępował, jest znaczna liczba skażeń toksycznych, pożarów i wybuchów odnotowana przez Głównego Inspektora Ochrony Środowiska. Wzrasta tym samym prawdopodobieństwo związane z występowaniem tych zdarzeń oraz prawdopodobieństwo wystąpienia skutków określonego rodzaju. Kombinacja tych dwóch elementów, prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niekorzystnego wraz z jego skutkami definiowana jest jako ryzyko. Podejmując działania, redukujące jeden z nierozzerwalnych jego członów decydujemy o poziomie bezpieczeństwa.

Zmniejszanie prawdopodobieństwa lub minimalizowanie skutków zdarzeń niekorzystnych dotyczy w znacznej mierze działań prewencyjnych, czy też profilaktycznych, które powinno być realizowane na etapie planowania i zagospodarowania przestrzennego. Na ogół jednak błędy, których można było uniknąć popełniane są na tym właśnie etapie. Sprowadzają się one do tego, że przy tworzeniu miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego nie uwzględnia się czynników ryzyka występujących na danym terenie. Efektem tego jest lokalizacja budynków zamieszkania zbiorowego, obiektów użyteczności publicznej i innych istotnych dla bezpieczeństwa i obronności w sąsiedztwie zakładów o dużym i zwiększonym ryzyku wystąpienia poważnej awarii, jak ma to miejsce w Warszawie. Decyzja, dotycząca zamknięcia takiego zakładu ma charakter polityczny, bo może pociągnąć za sobą wzrost bezrobocia i przestępczości, co niekorzystnie wpływa na koniunkturę gospodarki. Z wielu powodów decyzje te nie są podejmowane.

Transport towarów niebezpiecznych odbywa się przez centra dużych miast, a przecież skutki powstałe w wyniku uwolnienia 20 ton ciekłego chloru do atmosfery objęłyby kilka dzielnic m.st. Warszawy.

Rozróżnienie tego, co zapobiega powstaniu zdarzeń, a co ogranicza jego skutki, w wielu wypadkach jest sprawą bardzo istotną z punktu widzenia osiągania określonych celów. W wielu przypadkach ilościowe określenie skutków jest jednak bardzo trudne. Niezbędne staje się modelowanie rozwoju tych zdarzeń.

Coraz bardziej złożony labirynt współczesności nie pozwala na tylko i wyłącznie intuicyjnie podejmowanie ważnych decyzji. Konieczne jest, zatem sięgnięcie do narzędzi wspomagających ten proces. Wiedza na temat potencjalnych skutków umożliwia podejmowanie działań mających na celu ich redukcję. Istnieje wiele modeli fizykochemicznych, których wykorzystanie pozwala modelować skutki zdarzeń z udziałem substancji niebezpiecznych. Istnieje też wiele programów komputerowych, a ALOHA stanowi tylko jeden z nich. Zastosowanie właściwych narzędzi pozwalających przetwarzać informacje zwiększa prawdopodobieństwo podejmowania optymalnych decyzji. Należy mieć jednak świadomość, że systemy informatyczne ułatwiają sterowanie sytuacjami awaryjnymi, ale to zawsze człowiek, jego wiedza i doświadczenie decydują o umiejętności korzystania z dobrodziejstw współczesnej technologii. Programy komputerowe podpowiadają pewne rozwiązania, ale podjęcie decyzji należy do decydenta i pociąga za sobą odpowiedzialność za życie i/lub zdrowie zagrożonej społeczności oraz stan środowiska.