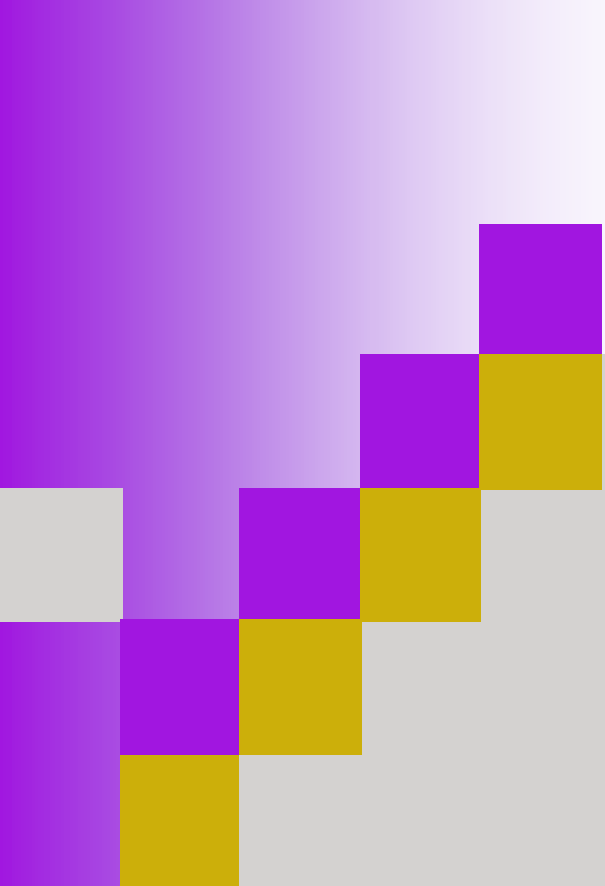




Metody szacowania skutków wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych

dr Anna Wawrzyńczak-Szaban

**Zakład Energetyki Jądrowej i Analiz
Środowiska
UZ3**



Abstrakt

- Celem prezentacji jest przedstawienie metodyki szacowania ryzyka różnych typów awarii z szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na zdrowie człowieka. Szacując ryzyko konieczne jest posiadanie informacji o: 1) częstotliwości/prawdopodobieństwie awarii lub łańcucha zdarzeń powodującego awarię; 2) rodzaju i rozkładzie efektów fizycznych awarii takich jak rozkład stężeń uwolnionej substancji, strumienia ciepłego czy też fali ciśnieniowej oraz 3) stosunku pomiędzy efektem fizycznym zdarzenia, a rozmiarami uszkodzeń.
- W trakcie seminarium zaprezentowane zostanie podejście oparte o funkcje probitowe pozwalające określić prawdopodobieństwo wystąpienia urazów ponoszonych w skutek działania bodźców zewnętrznych zaistniałych w efekcie danego typu awarii. Warunkiem stosowania odpowiednich funkcji jest istnienie bazy literaturowej i doświadczalnej o rozkładach statystycznych wiążących prawdopodobieństwo obrażeń z całkowitą wielkością przyjętej dawki.



Plan wykładu

- Projekt Evaris
- Założenia systemu RAT-IF
- Metodologia wyznaczania ryzyka lokalnego, indywidualnego i społecznego
- Model skutków- Funkcje probitowe
- Zastosowanie funkcji probitowych na przykładzie uwolnienia chloru
- Funkcje probitowe- wyprowadzenie

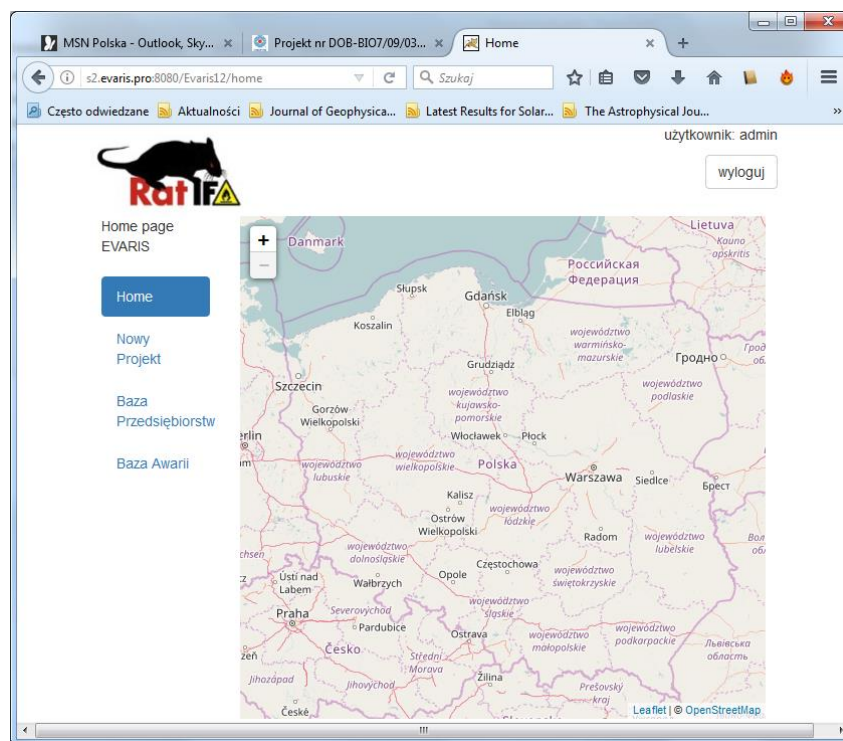


Projekt EVARIS

- **Tytuł „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem”**
- Realizowany przez Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodziowej im. Józefa Tuliszkowskiego - Państwowy Instytut Badawczy, przy współpracy:
 - Narodowe Centrum Badań Jądrowych
 - Politechnika Warszawska
 - BERA Systems Sp. z o.o

Projekt EVARIS

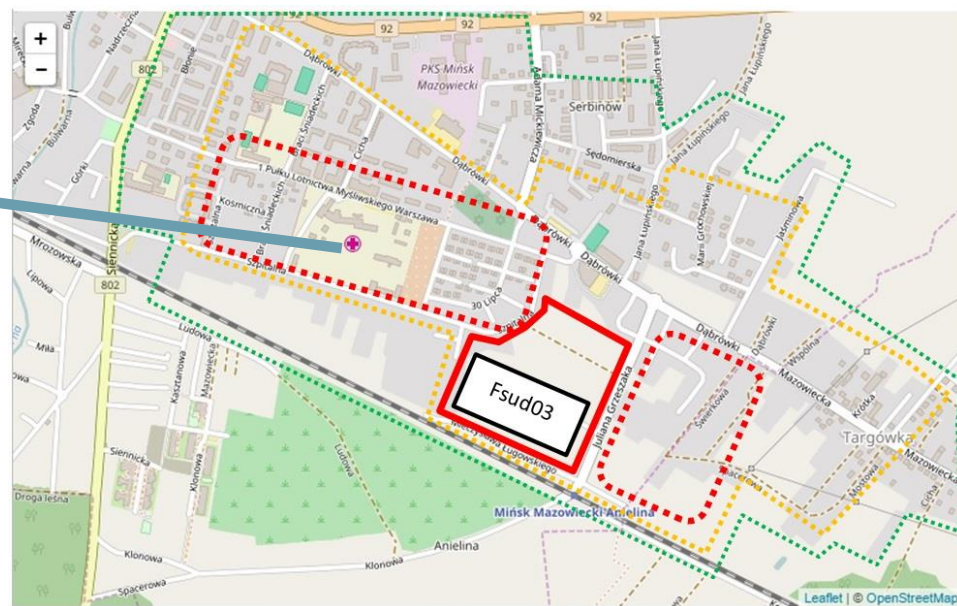
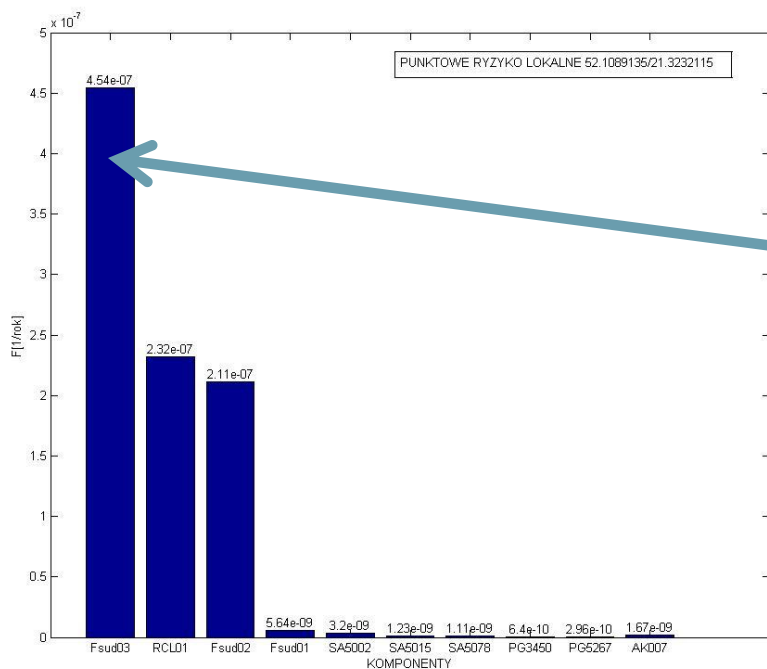
- **Celem projektu** jest opracowanie programu do oceny ryzyka w zakładach stwarzających zagrożenie poza swoim terenem.



Generalne założenia systemu RAT-IF

System powinien wyznaczać dla danego obszaru:

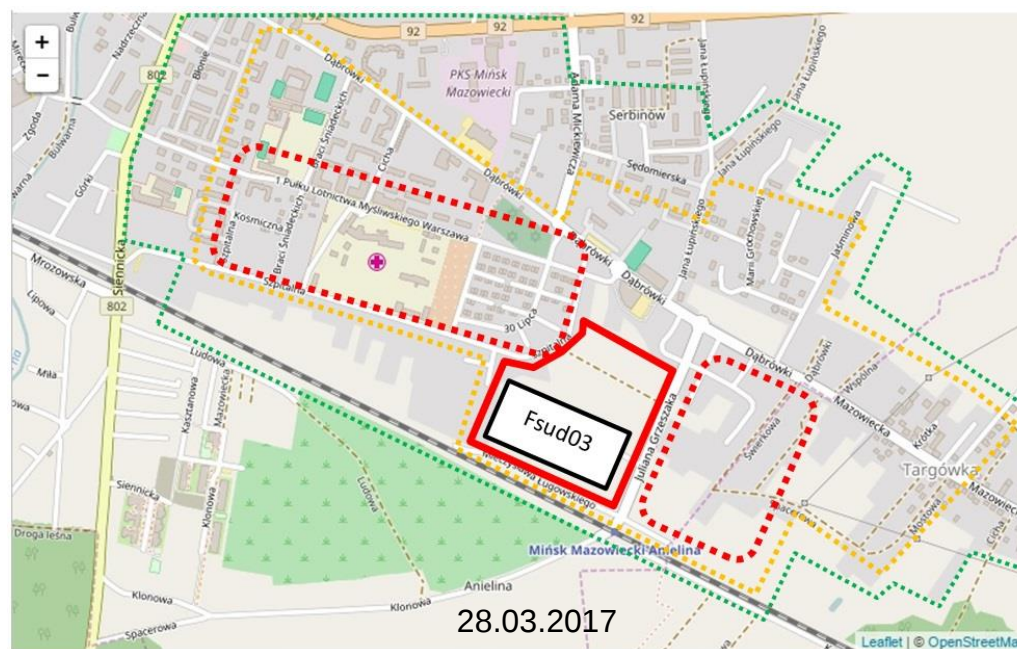
- **Ryzyko lokalne** : częstość szkód referencyjnych (np. śmiertelność) w wyniku wypadku w danym punkcie obszaru.
 - Prezentacja ryzyka w postaci konturów ryzyka oraz histogramu pokazującego wielkość ryzyka i wkład od różnych źródeł w punkcie



Generalne założenia systemu RAT-IF

System powinien wyznaczać dla danego obszaru:

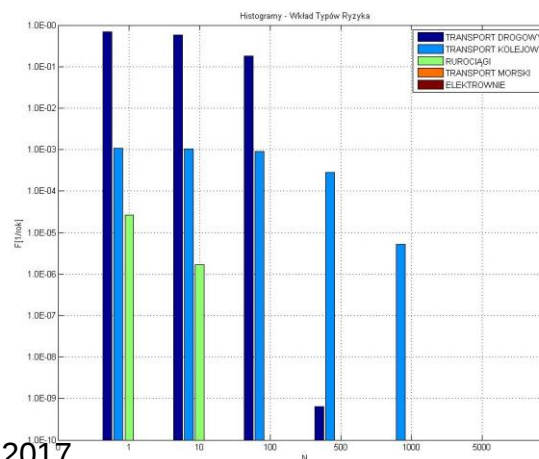
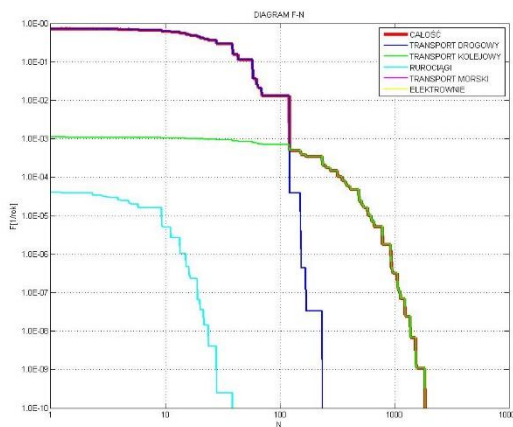
- **Ryzyko Indywidualne** : podobnie jak powyżej, ale w ewaluacji referencyjnych szkód uwzględnia się inne wielkości jak np. średni czas ekspozycji, możliwość ochrony w budynku.
- Prezentacja ryzyka w postaci konturów ryzyka. Miejsca o szczególnej wrażliwości (jak szkoły, szpitale i inne) mogą być uwzględnione w obliczeniach ryzyka indywidualnego



Generalne założenia systemu RAT-IF

System powinien wyznaczać dla danego obszaru:

- **ryzyko społeczne:** uwzględnia liczbę osób która może być dotknięta skutkami awarii.
 - Prezentacja w postaci krzywej F-N tj. wykresu skumulowanej częstości awarii ze wszystkich źródeł które dotknęła nie więcej niż N osób.
 - Inny sposób prezentacji to histogram I-N pokazujący liczbę osób (N) eksponowanych na indywidualne ryzyko w przedziale I (np. śmiertelność/rok 10^{-6} - 10^{-5}).



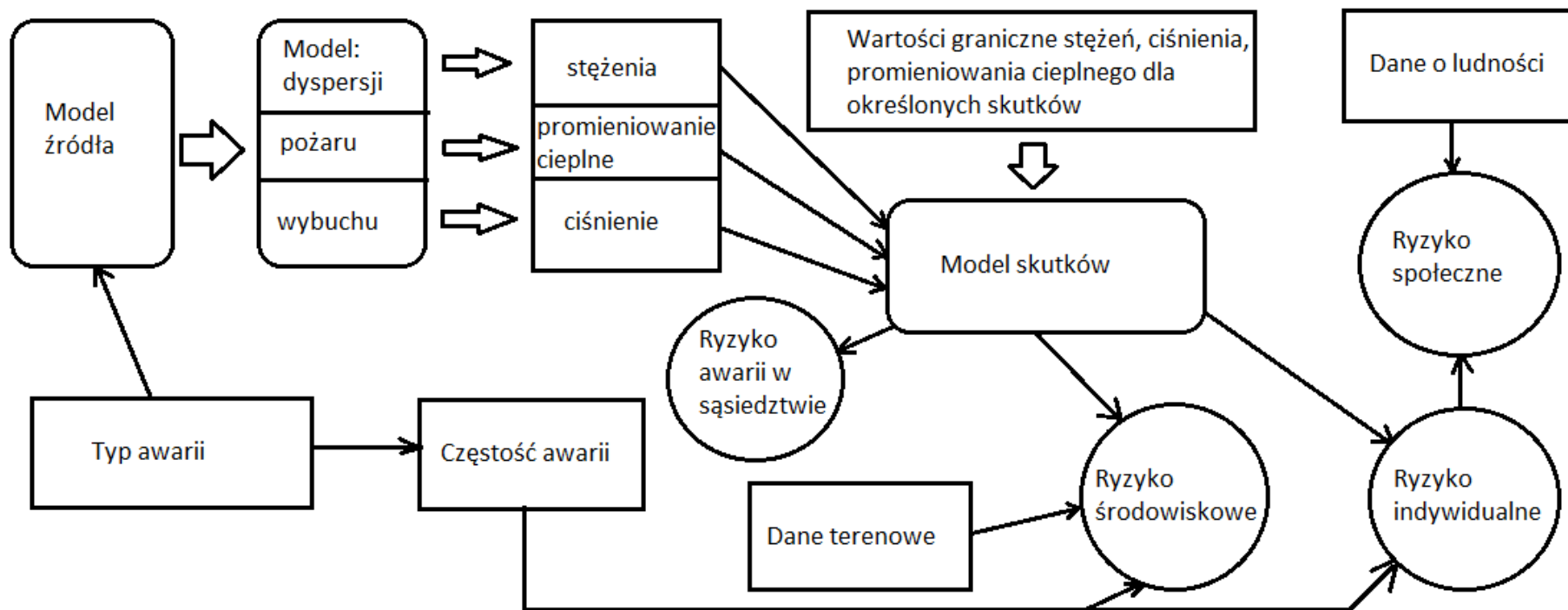
28.03.2017



Rodzaje poważnych awarii przemysłowych

- emisja toksycznych par lub gazów
- emisja palnych par lub gazów
- pożar strumieniowy
- pożar rozlewiska
- pożar kulisty
- pożar obłoku par lub gazów
- wykipienie i wyrzut cieczy palnych ze zbiornika
- wybuch obłoku par lub gazów
- wybuch materiału wysokoenergetycznego lub rozkład wybuchowy nadtlenków

Łańcuch modelowy

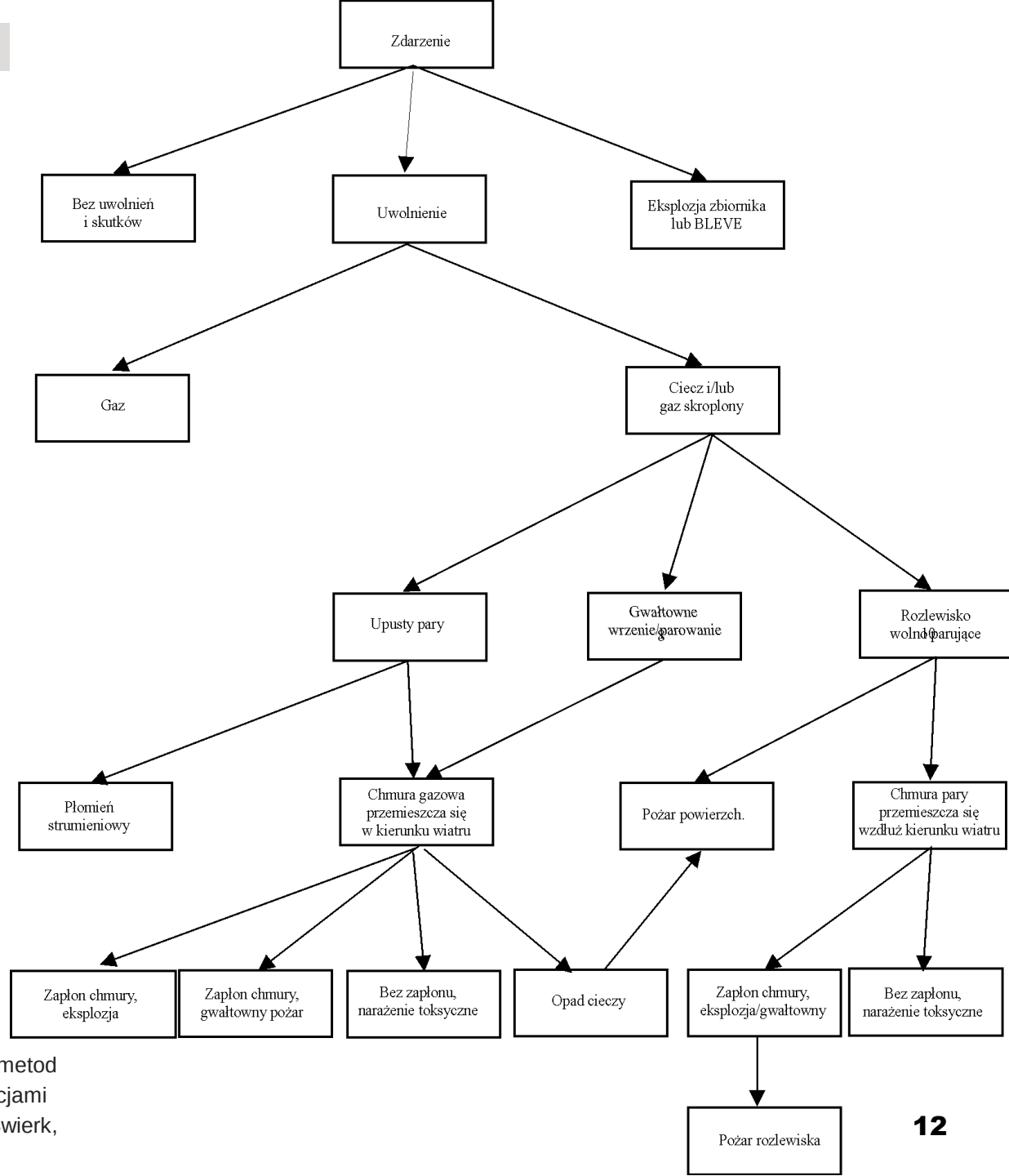


- typ awarii determinuje człon źródłowy
- model dyspersji, pożaru lub wybuchu (bądź ich kombinacje)
- model skutków (**w oparciu o funkcje probitowe** lub wartości graniczne)
- ryzyko indywidualne i ryzyko społeczne (dane o populacji na danych obszarze)
- model skutków środowiskowych
- ryzyko awarii na instalacje pobliskie wyznaczane na podstawie modelu skutków.

Wykaz rodzajów awarii chemicznych i potencjalnych miejsc ich występowania

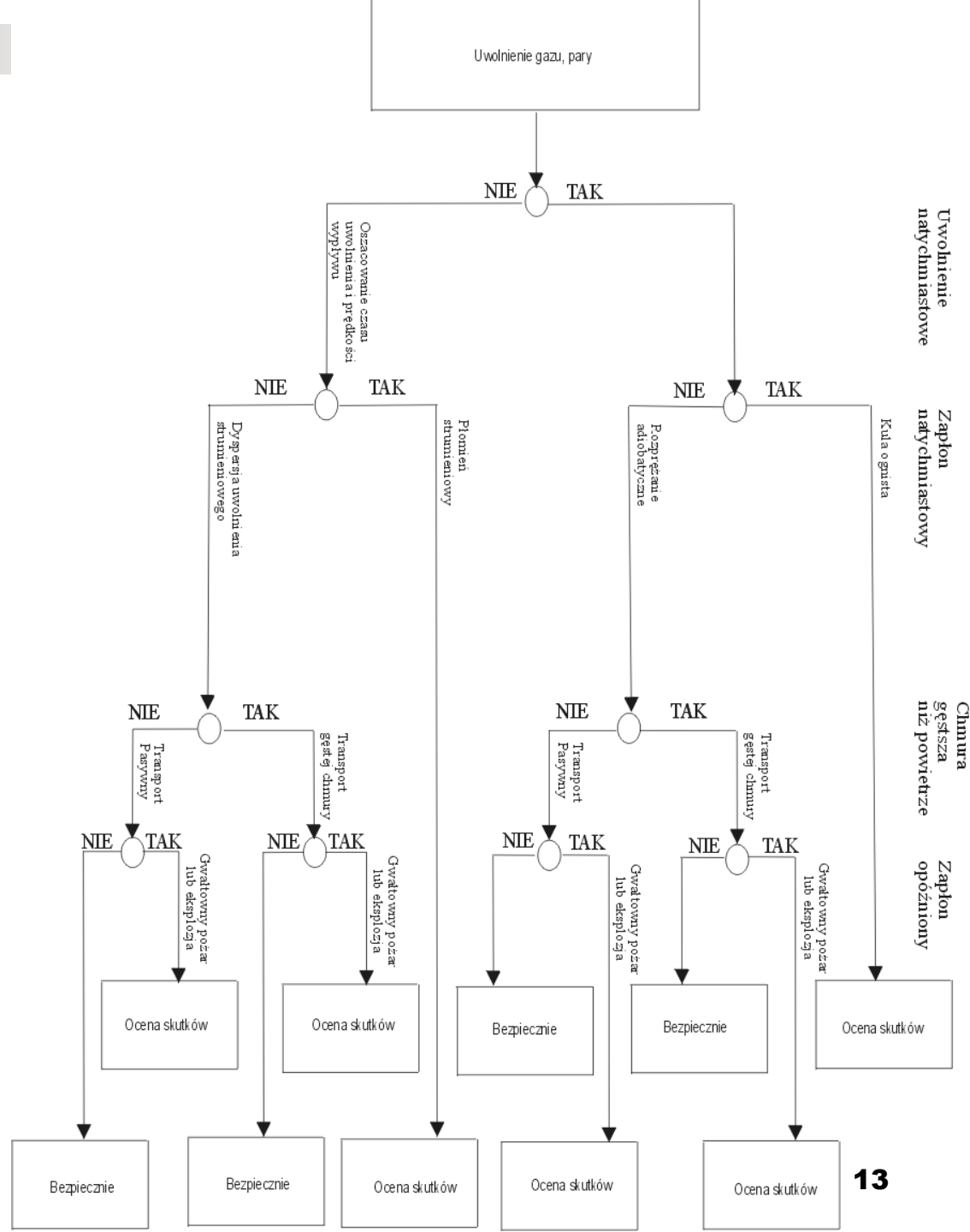
Rodzaj substancji/instalacji/operacji	Rodzaj wypadku						
	Pożary	BLEVE	Gwałtowny pożar VCE	Wybuch		Gaz toksyczny	Dymy toksyczne
				Pyl	Inne		
Skroplone gazy palne							
- zbiorniki ciśnieniowe	x	x	x	x			
- magazynowanie pod ciśnieniem atmosferycznym	x	x	x	x			
- instalacje procesowe	x	x	x	x			
- miejsca przeładunku transportu drogowego/kolejowego	x	x	x	x			
- transport drogowo-kolejowy	x	x	x	x			
- transport wodny/operacje na nabrzeżach	x		x	x			
- rurociągi przemysłowe							
Ciecze palne	x	x					
- zbiorniki magazynowe	x	x	x	x			
- instalacje procesowe	x						
- miejsca przeładunku transportu drogowego/kolejowego	x						
- transport drogowo-kolejowy	x						
- transport wodny/operacje na nabrzeżach	x						
- rurociągi przemysłowe							
Magazynowanie i przetwarzanie	x		x	x			
- gaz palny	x			x			
- palne substancje sproszkowane	x			x	x		x
- silnie reagujące substancje					x	x	
- gazy toksyczne							x
- substancje o toksycznych produktach spalania							

Typowe drzewo zdarzeń dla awarii z uwolnieniem substancji niebezpiecznej



Drzewo zdarzeń dla pożarów uwolnionego gazu

Borysiewicz M., Furtek A., Potemski S., Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi, Instytut Energii Atomowej Otwock –Swierk, 2000



Ryzyko lokalne dla obszaru punktowego P

$$RL(P) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{s=1}^{N_{ST}} p_{i,s} \sum_{j=1}^{N_I(i)} \alpha_{i,j} \sum_{cv=1}^{N_{CV}} \sum_{\theta_v=1}^{N_{\theta_v}} p_{cv,\theta_v/s} \bar{v}_{i,j,cv,\theta_v} (x_{S \rightarrow P})$$

- λ_i prawdopodobieństwo zdarzenia inicjującego i ;
- $p_{i,s}$ Prawdopodobieństwo pojawienia się zdarzenia inicjującego i w porze roku s (wartość = $\frac{1}{4}$ jeśli zakładany jest jednorodny rozkład po porach roku) $s = 1, \dots, N_S$;
- $\alpha_{i,j}$ jest prawdopodobieństwem zdarzenia j będącego wynikiem zdarzenia inicjującego i ($i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N_I(i)$);
- $p_{cv,\theta_v/s}$ prawdopodobieństwo pojawienia się par cv ($cv = 1, \dots, N_{CV}$) typu dana “prędkość wiatru + klasa stabilności” w kierunku cv, w porze roku s; $v = 1, \dots, N_{\theta_v}$;
- $\bar{v}_{i,j,cv,\theta_v} (x_{S \rightarrow P})$ - oznacza średnią wrażliwość w związku z wszystkimi scenariuszami zdarzeń, których kierunek rozprzestrzeniania się obejmuje sektor róży wiatrów zawierający kierunek θ_v . Wartość tą rozpatruje się jako „uśredniony scenariusz wypadku” (zdarzeń)

Ryzyko indywidualne dla danej kategorii ludzi (*cat*) dla obszaru punktowego P

$$RI^{cat}(P) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \sum_{s=1}^{N_{ST}} p_{i,s} \sum_{g=1}^2 p_{i,g} \sum_{j=1}^{N_I(i)} \alpha_{i,j} \sum_{cv=1}^{N_{CV}} \sum_{\theta_v=1}^{N_{\theta_v}} p_{cv,\theta_v/s} \bar{v}_{i,j,cv,\theta_v}(X_{S \rightarrow P}) \sum_{io} p_{io/s/g}^{cat} \beta_{i,j,io}$$

gdzie dodatkowo uwzględniamy

- $p_{i,g}$ prawdopodobieństwo pojawienia się zdarzenia inicjującego i w danej porze dnia (dzień/noc) g ;
- $p_{io/s/g}^{cat}$ prawdopodobieństwo bycia danej kategorii ludzi (*cat*) w środku/na zewnątrz (IO) budynku w trakcie danej pory roku s w ciągu dnia/nocy g ;
- $\beta_{i,j,io}$ współczynnik osłabienia wyniku danego wypadku w związku z przebywaniem danej kategorii ludzi w wnętrzu budynków (IO).
- *cat* – kategorie ludzi na danym terenie: rezydenci, turyści, pracownicy.

Ryzyko społeczne

- Należy wyznaczyć średni scenariusz wypadku w SC, jego częstotliwość wyznaczana jest: $F_{sc}(i, j, s, g, cv, \theta_v) = \lambda_i p_{i,s} p_{i,g} \alpha_{i,j} p_{cv, \theta_v / s}$

- Ponieważ populacja jest rozłożona na terenie koncentrując się w miejscach szczególnych jak szpitale, kościoły, stadiony, supermarkety to, aby wykonać obliczenia należy przyjąć, że liczba zgonów w punktach siatki wynika z

$$N_{sc}(i, j, s, g, cv, \theta_v) = \sum_{P_{ef}} \sum_{k=1}^{N_{cat}} N_k \bar{v}_{i,j,cv,\theta_v}(x_{S \rightarrow P_{ef}}) \sum_{io} p_{io/s/g}^k \beta_{i,j,io}$$

- gdzie
- P_{ef} - jest zbiorem punktów, gdzie efekty fizyczny rozpatrywanego scenariusza nie jest nieistotny.
- Otrzymane w ten sposób pary F_{sc} oraz N_{sc} są podstawowymi elementami koniecznymi do stworzenia krzywej F/N.



Modele skutków - Funkcje probitowe

- Modele uszkodzeń stosowane są w celu określenia urazów ludzi ponoszonych wskutek eksplozji, obciążenia cieplnego lub toksycznego.
- Modele takie zwykle otrzymuje się na podstawie badań na zwierzętach lub na podstawie analizy urazów powstałych wskutek zaistniałych wypadków.
- Modele te przedstawione są za pomocą tzw. funkcji probitowych. Łączą one konkretne obciążenie/dawkę z udziałem procentowym ludzi, którzy doznają szczególnego typu uszkodzenia lub urazu

Funkcje probitowe

Ogólna postać funkcji probitowej przedstawia następującą zależność:

$$P_r = A + B \ln L,$$

gdzie:

P_r - funkcja probitowa będąca miarą procentową ludzi, którzy eksponowani na dany typ obciążenia doznają konkretnego typu uszkodzenia,

A , B - stałe zależna od typu urazu oraz rodzaju obciążenia,

L - obciążenie (dawka obciążeniowa).

- P_r wartość w przedziale $\langle 2.67 , 8.09 \rangle$ reprezentującym $\langle 1\% , 99.9\% \rangle$ umieralności w skutek danej dawki obciążeniowej

Dawka obciążeniowa L

Gazy toksyczne

W danym miejscu stężenie **C** może zmieniać się w czasie wraz z przemieszczaniem i rozrzedzaniem chmury zanieczyszczeń. Całkowity ładunek toksyczny dla danego miejsca obliczamy rozpatrując **m** różnych etapów czasowych za pomocą równania:

$$L = \sum_{i=1}^m (C_i^N t_i)$$

- **N** - stała równania probitowego charakterystyczna dla danego rodzaju substancji;
- **C** [ppm] – stężenie w środku chmury w przypadku uwolnienia chwilowego lub też stężenie wzdłuż linii środkowej chmury dla uwolnienia ciągłego.
- **t**-czas[min].

Funkcje probitowe - substancje toksyczne

- Opublikowanych zostało wiele funkcji probitowych pozwalających na oszacowanie efektów danego typu obciążenia np.:
 - TNO “Green Book” (1992)
 - Louvar J.F. and Louvar B.D. (1998)
 - Lees (2005)
- Porównując wyniki równania probitu dla tego samego zagrożenia można zaobserwować znaczną zmianę szacunków efektu dawki.

Table 1: Probits for hazardous gases taken from NORSOK Z013 (DNV / Scanpower)

Substance	K_1 A	K_2 B	n N	LC ₅₀ 5 min exposure
Ammonia NH ₃	-9.82	0.71	2	15240
Sulphur Dioxide SO ₂	-15.67	2.1	1	3765
Hydrogen Fluoride HF	-48.33	4.853	1	11845

Funkcje probitowe-substancje toksyczne

Table 2: Sample probits taken from Lees (2005) and estimated dose effects.

Material	A	B	N	LC ₁ (ppm)		LC ₅₀ (ppm)	
	K ₁	K ₂	n	5 min	30 min	5 min	30 min
Acrolein	-9.93	2.05	1.0	93	16	291	48
Ammonia	-35.9	1.85	2.0	15057	6147	28264	11539
Benzene	-109.78	5.3	2.0	18096	7388	22545	9204
Carbon monoxide	-37.98	3.7	1.0	11810	1968	22169	3695
Chlorine	-8.29	0.92	2.0	173	71	613	250
Hydrogen chloride	-16.85	2.0	1.0	3464	577	11106	1851
Hydrogen sulphide	-31.42	3.008	1.43	897	256	1543	441
Nitrogen dioxide	-13.79	1.4	2	160	65	367	150
Phosgene	-19.27	3.686	1.0	77	13	145	24
Sulphur dioxide	-15.67	2.1	1.00	1241	207	3764	627
Toluene	-6.794	0.41	2.5	5352	2614	51965	25377
Hydrogen Fluoride	-35.87	3.354	1	19652	3260	39184	6531
Hydrogen Cyanide	-29.42	3.008	1.43	564	161	969	277

Dawka obciążeniowa L

Pożary- Skutkiem stanowiącym bezpośrednie zagrożenie dla życia ludzi jest promieniowanie termiczne

$$L = q^{4/3} * t$$

- **q**- promieniowanie termiczne [kW/m²]
- **t**- czas ekspozycji [sekundy].
- Opracowano kilka funkcji probitowych w oparciu o eksperymenty przeprowadzone na zwierzętach i ludzi.
- Wśród najczęściej używanych w analizie konsekwencji są te opracowane przez Eisenberga, Leesa, Tsao i Perry i TNO.

Funkcje probitowe -promieniowanie cieplne

Table 17: Commonly referenced probit functions

Source	Probit equation	Lethal dose	
		1%	50%
Eisenberg et al (1975)	$Y = -14.9 + 2.56 \ln V$	960	2380
Tsao & Perry (1979)	$Y = -12.8 + 2.56 \ln V$	420	1046
Lees (1994)	$Y = -10.7 + 1.99 \ln V$	828	2670
TNO	$Y = -15.3 + 3.02 \ln V$	389	841

Note: "V" in the above probits is the thermal dose where $V = I^{4/3} \times t$

Dawka obciążeniowa L

Wybuch - Skutkiem stanowiącym bezpośrednie zagrożenie dla życia ludzi jest nadciśnienie powstałe w wyniku zapłonu powodującego eksplozję

$$L = P$$

- P- skok nadciśnienia [psig][barg]
- Poziom nadciśnienia niezbędny do wyrządzenia szkody określa się zazwyczaj jako funkcję szczytowego nadciśnienia, bez względu na czas narażenia. Osoby narażone na nadciśnienie wybuchowe nie mają czasu na reagowanie lub schronienie, więc czas nie wchodzi w funkcję

$$Y = 1.47 + 1.37 \ln (P)$$

Pressure in psig units

(Equation 4a)

$$Y = 5.13 + 1.37 \ln (P)$$

Pressure in barg units

(Equation 4b)

P = peak overpressure (barg)

1% fatality

0.17 barg (2.4 psig)

50% fatality

0.90 barg (13.1 psig)

95% fatality

3.00 barg (43.5 psig)

Przeliczenie probitu na prawdopodobieństwo

$$Perc = 50 * \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Probit - 5}{\sqrt{2}} \right) \right) \quad (4.2)$$

with $\operatorname{erf}(z)$ —the error function, defined as:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (4.3)$$

A numerical solution for Eq. (4.3) is given by the polynomial approximation (Gheorghe and Vamanu 1996):

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(z) = 1 - & (0.254829592 * t - 0.284496736 * t^2 \\ & + 1.421413741 * t^3 - 1.453152027 * t^4 \\ & + 1.061405249 * t^5) * e^{-x^2} \end{aligned} \quad (4.4)$$

with

$$\begin{aligned} t = \frac{1}{1+p*z} \text{ and } p = 0.3275911 \quad \text{for } z \geq 0 \\ \text{and} \\ \operatorname{erf}(z) = -\operatorname{erf}(|z|) \quad \text{for } z < 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

20.05.2017

Przeliczenie probitu na prawdopodobieństwo

Percentage affected - probit transformation (taken from Finney, D.J., 1971. probit analysis, p25).

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Przykład - Dyspersja chloru

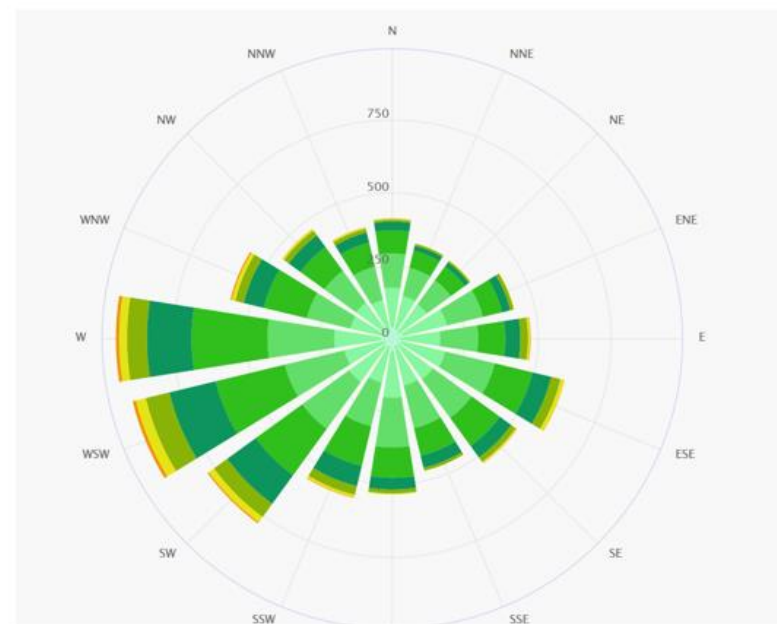
- Zakładamy, że nastąpiło uszkodzenie zaworu manualnego, średnica wlotu 150mm, całkowite uwolnienie, rozmiar uszkodzenia 50-150mm, prawdopodobieństwo $2,4 \cdot 10^{-6}$.
- Zakładamy, że w wyniku powyższego uszkodzenia nastąpił 10 minutowy (continous release) wypływ ciekłego chloru z prędkością $Q=2,7$ kg/s. W efekcie zostało uwolnione około 1500 kg chloru. Zakładamy, że czas ekspozycji wynosi 60 minut.
- Dla chloru w równaniu probitowym $N=2$, $A=-8,29$, $B=0,92$
- Stosując wzór na Pr można obliczyć, że przy tych założeniach wartość stężenia $LC50$ oznaczająca stężenie dla którego 50% populacji narażonej w czasie 60 minut ulegnie zatruciu śmiertelnemu wynosi $LC50=176$ ppm.

Przykład - Dyspersja chloru

- Aby policzyć ryzyko lokalne niezbędne jest uchronienie powyższej symulacji rozprzestrzeniania się chloru we wszystkich przypadkach możliwych warunków pogodowych estymowanych na podstawie danych pomiarowych

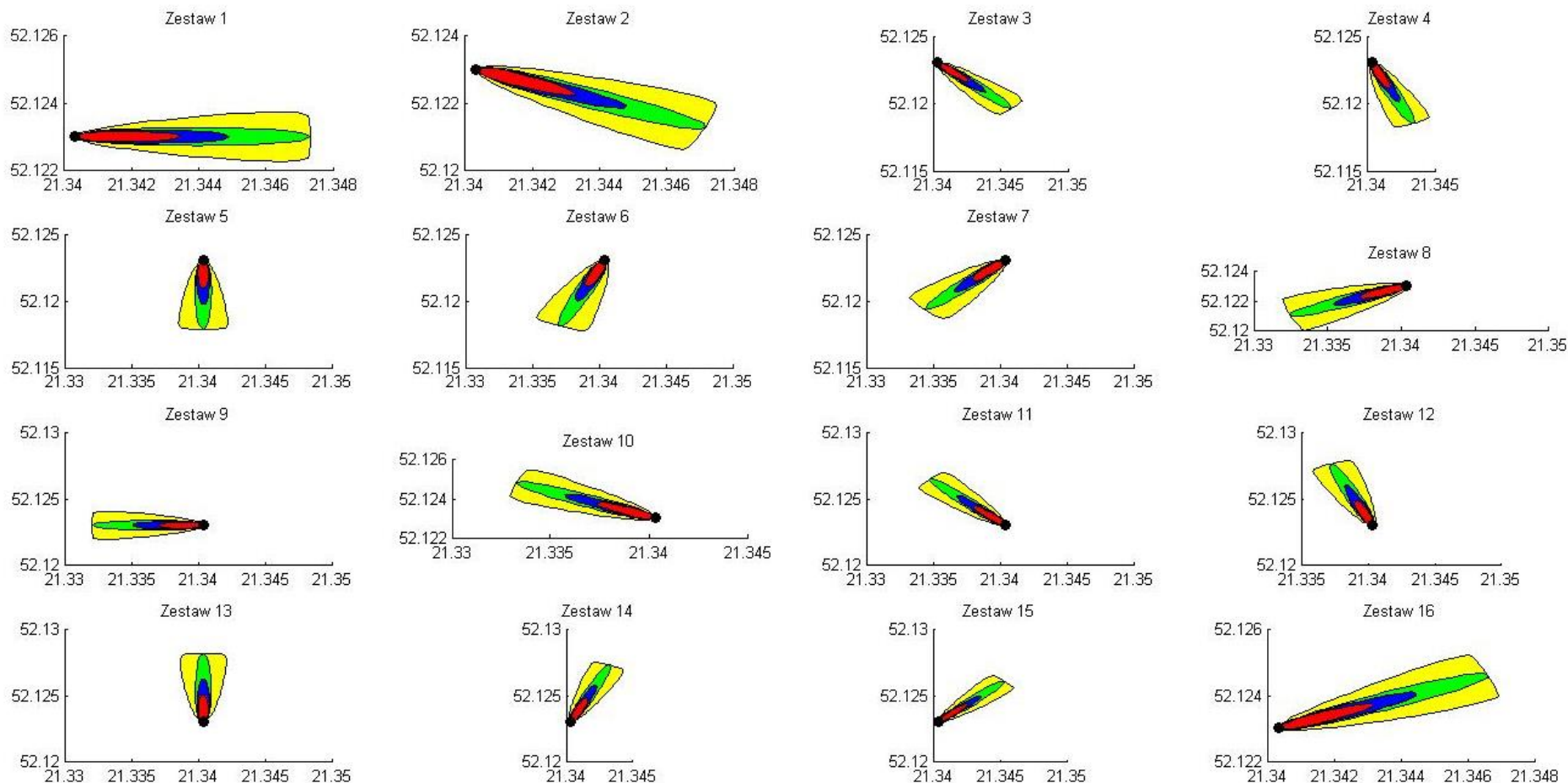
INDEX ZESTAWU	KIERUNEK WIATRU	M/S	S.C.	PRAWDOPODOBIENSTWO ZAISTNIENIA DANEGO ZESTAWU
1	W	5,11	C	1.37/100;
2	WNW	4,57	B	6.48/100;
3	NW	3,99	B	5.29/100;
4	NNW	3,82	B	4.47/100;
5	N	3,33	B	4.69/100;
6	NNE	3,11	B	3.81/100;
7	NE	3,17	B	3.77/100;
8	ENE	3,23	B	4.88/100;
9	E	3,46	B	5.38/100;
10	ESE	4,23	B	6.89/100;
11	SE	3,88	B	6/100;
12	SSE	3,58	B	5.30/100;
13	S	3,46	B	6.06/100;
14	SSW	4,41	B	6.38/100;
15	SW	4,91	B	8.88/100;
16	WSW	5,48	C	0.38/100;

Tabela 1. Dane meteorologiczne



Rys. 1 Róża wiatrów dla warunków meteorologicznych z Tabeli 1

Przykład - Dyspersja chloru



Rys 2. Wyniki obliczeń z Aloha dla 16 zestawów danych z Tabeli 1 (scenariuszy). Czarny okrąg określa lokalizację źródła
Level 1 = 430 ppm, AEGL-2 = 215 ppm i AEGL-1 = 100 ppm. .

Wybierz scenariusz:

Dyspersja chloru

Parametry wstępne

Prawdopodobieństwo zajścia wydarzenia inicjującego:

2.4E-6

Pora dnia:

Cała doba

☒ Uwzględniać więcej pór roku?

Prawdopodobieństwa przypisane porom roku

Zima

0.25

Wiosna

0.25

Lato

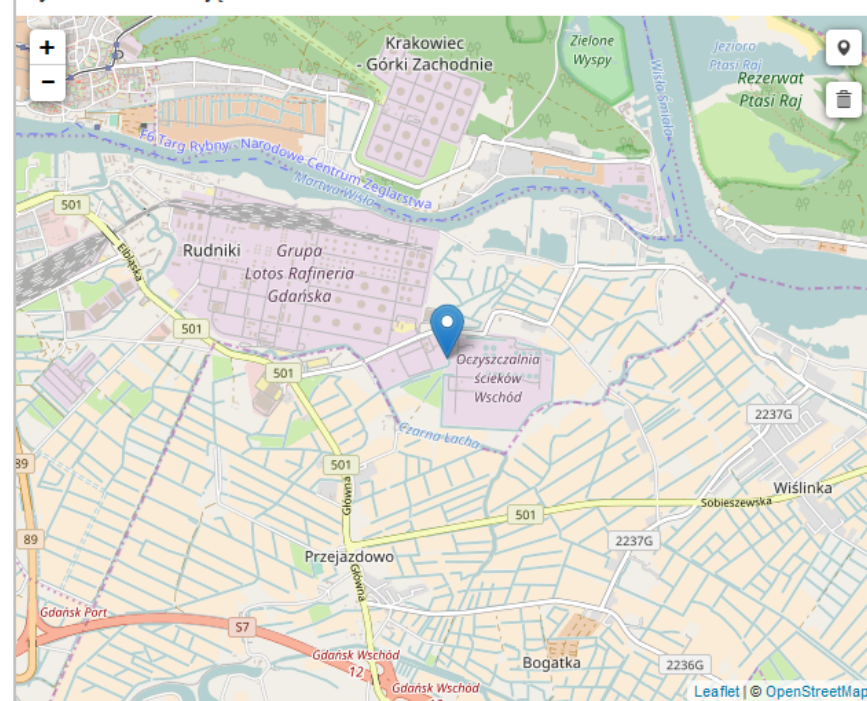
0.25

Jesień

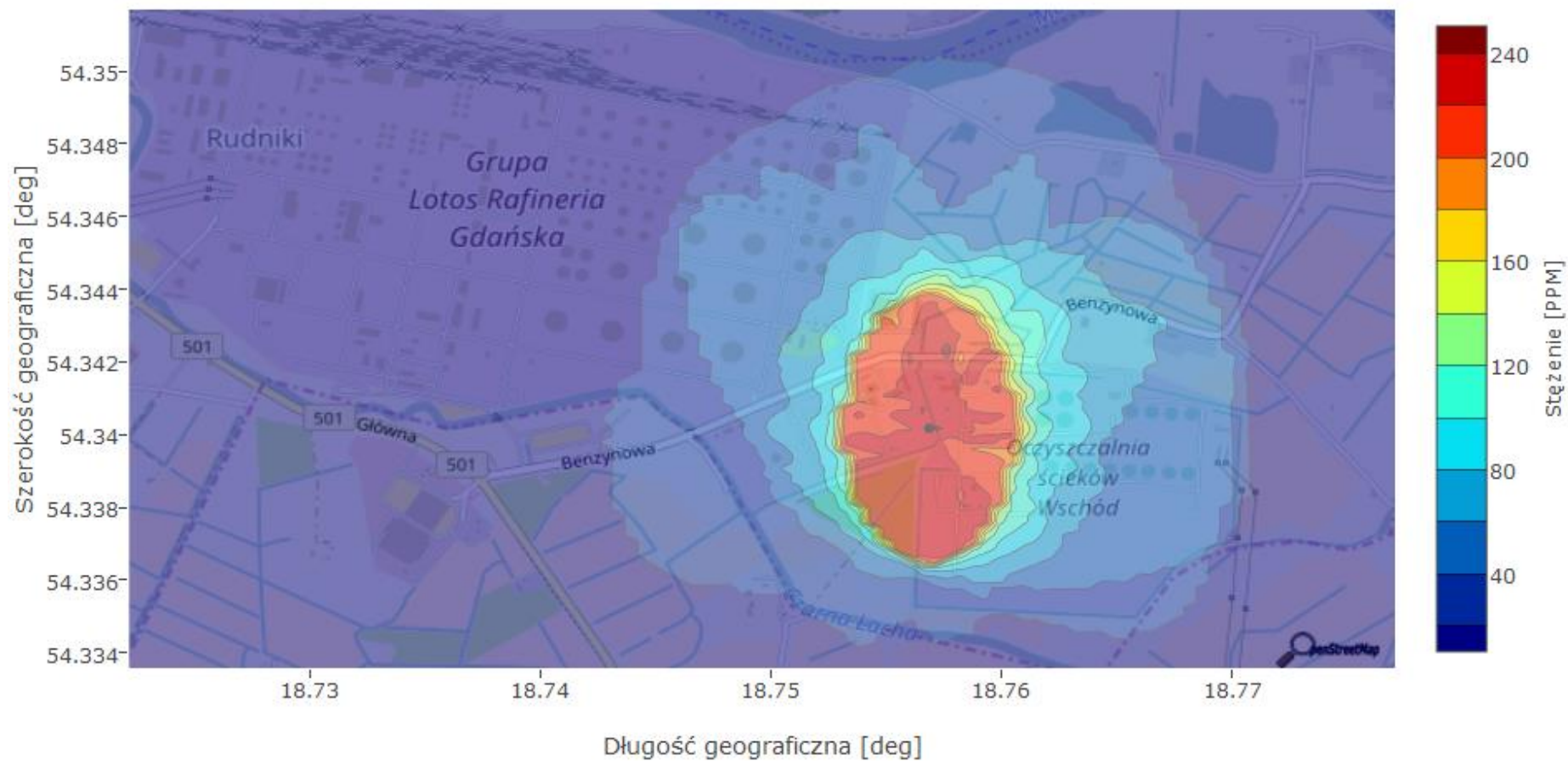
0.25

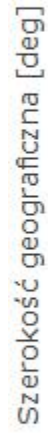
☐ Czy są wydarzenia następujące?

Wybierz lokalizację



Uśrednione stężenie analizowanej substancji





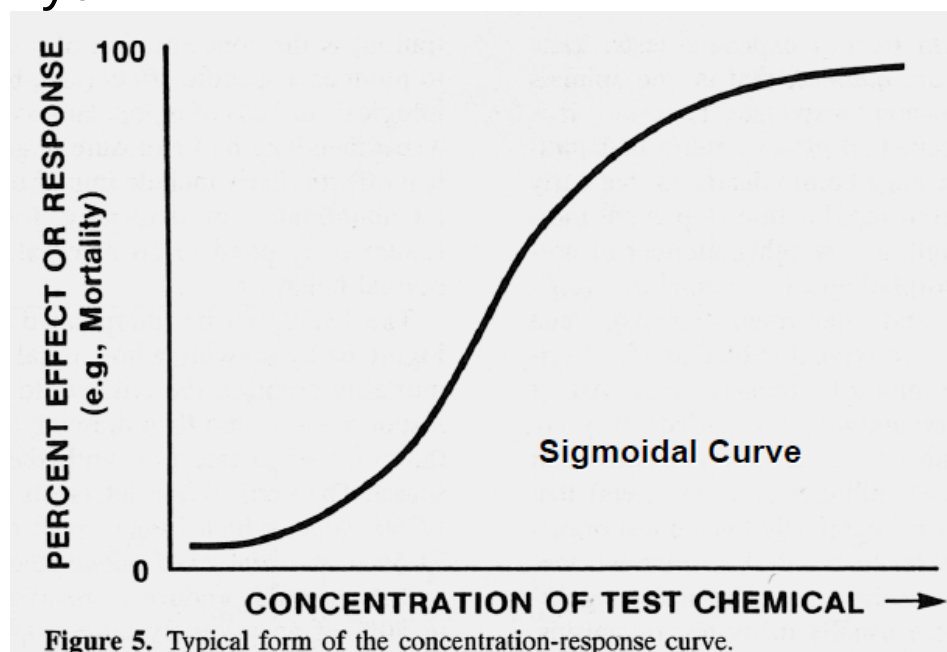


Funkcje probitowe - początki

- Idea analizy probitowej po raz pierwszy została zaproponowana w *Science* przez Ittnera Blissa w 1934.
- Pracował jako entomolog na stacji doświadczalnej w stanie Connecticut i zajmował się przede wszystkim poszukiwaniem skutecznego pestycydu w zwalczaniu owadów, które karmiły liśćmi winogron.
- Poprzez sprecyzowanie reakcji owadów na różne stężenia pestycydów można wizualnie zobaczyć, że każdy pestycyd wpływa na owady w różnych stężeniach, tj. jeden był bardziej skuteczny od drugiego. Jednak Bliss nie miał statystycznie dobrej metody porównywania tej różnicy.

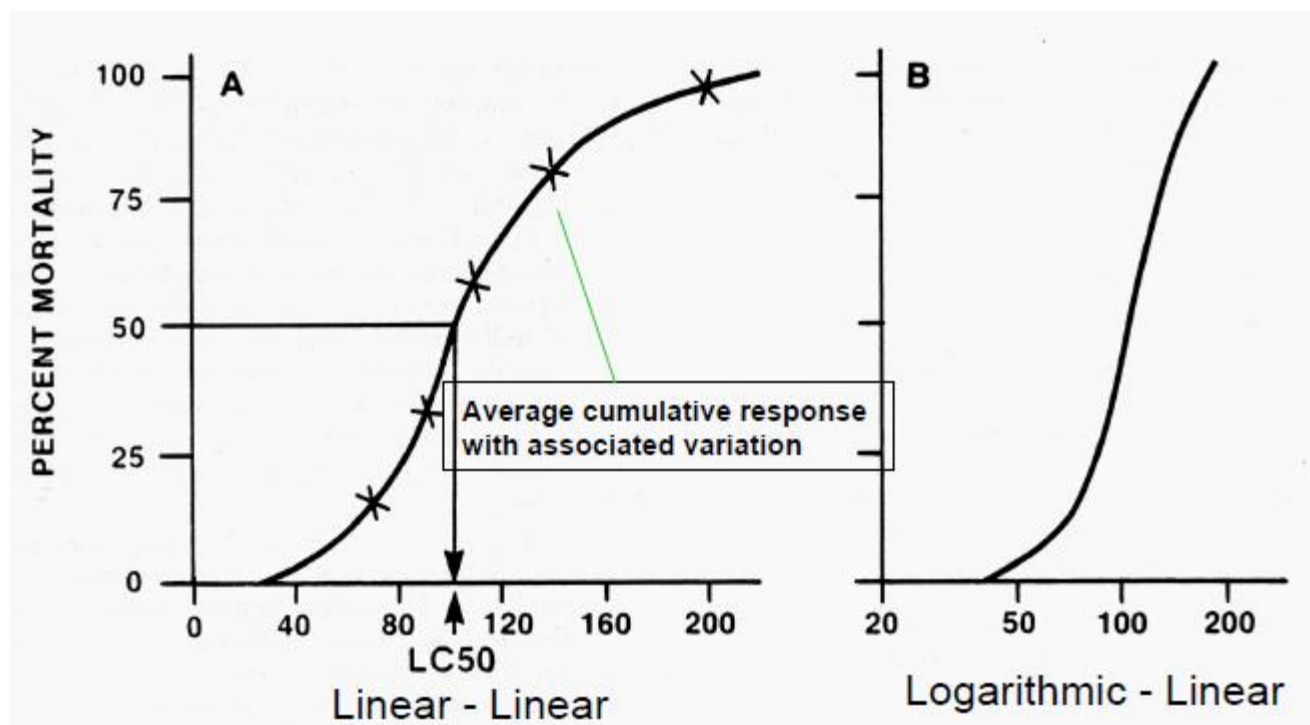
Funkcje probitowe-początki

- Najbardziej logicznym podejściem byłoby dopasowanie regresji do odpowiedzi na stężenie lub dawkowanie i porównanie różnych pestycydów.
- Jednak zależność odpowiedzi na dawkę miała z natury charakter funkcji sigmoidalnej, natomiast w ówczesnych czasach liczone linie regresji jedynie dla danych liniowych.
- Dlatego też Bliss opracowała ideę przekształcenia krzywej sigmoidalnej dawka-efekt (dose-response) na prostą.



Funkcje probitowe-początki

- W 1952 roku profesor statystyki na Uniwersytecie w Edynburgu David Finney sięgnął po pomysł Bliss'a i napisał książkę „Probit Analysis” (Finney 1952).
- Dzisiejsza analiza probitowa jest nadal preferowaną metodą statystyczną w zrozumieniu relacji dawka-efekt.





Funkcje probitowe-podstawy

- Analiza probitowa jest wyspecjalizowanym modelem regresji zmiennych opisywanych funkcją dwumianową
- Jest ona powszechnie stosowana w toksykologii w celu określenia względnej toksyczności substancji chemicznych dla organizmów żywych.
- Dokonuje się tego poprzez testowanie odpowiedzi organizmu w różnych stężeniach każdej z chemikaliów, a następnie porównanie stężeń, z którymi napotyka się odpowiedź.
- Jak wspomniano powyżej, odpowiedź jest zawsze dwumianowa (na przykład śmierć / bez śmierci), a zależność między odpowiedzią a różnymi stężeniami jest zawsze sigmoidalna.
- Analiza probitowa działa jako przekształcenie z funkcji sigmoidalnej do liniowej, a następnie prowadzi regresję relacji.



Funkcje probitowe-podstawy

- Kiedy regresja zostanie uruchomiona, badacz może wykorzystać wynik analizy probitowej w celu porównania ilości chemikaliów potrzebnych do stworzenia tej samej odpowiedzi w każdym z różnych chemikaliów.
- Istnieje wiele punktów końcowych stosowanych do porównywania różnych toksyczności substancji chemicznych, ale LC50 (ciecze) lub LD50 (ciała stałe) są najszerzej stosowanymi rezultatami współczesnych eksperymentów na dawkę.
- LC50 / LD50 reprezentuje stężenie (LC50) lub dawkę (LD50), na którą odpowiada 50% populacji.

Algorytm

Dose/Conc.	Total	Dead	Log Dose	Proportion
0.00	30	0		0.00
1.00	30	6	0.000	0.20
10.00	30	13	1.000	0.43
100.00	30	22	2.000	0.73
1000.00	30	30	3.000	1.00

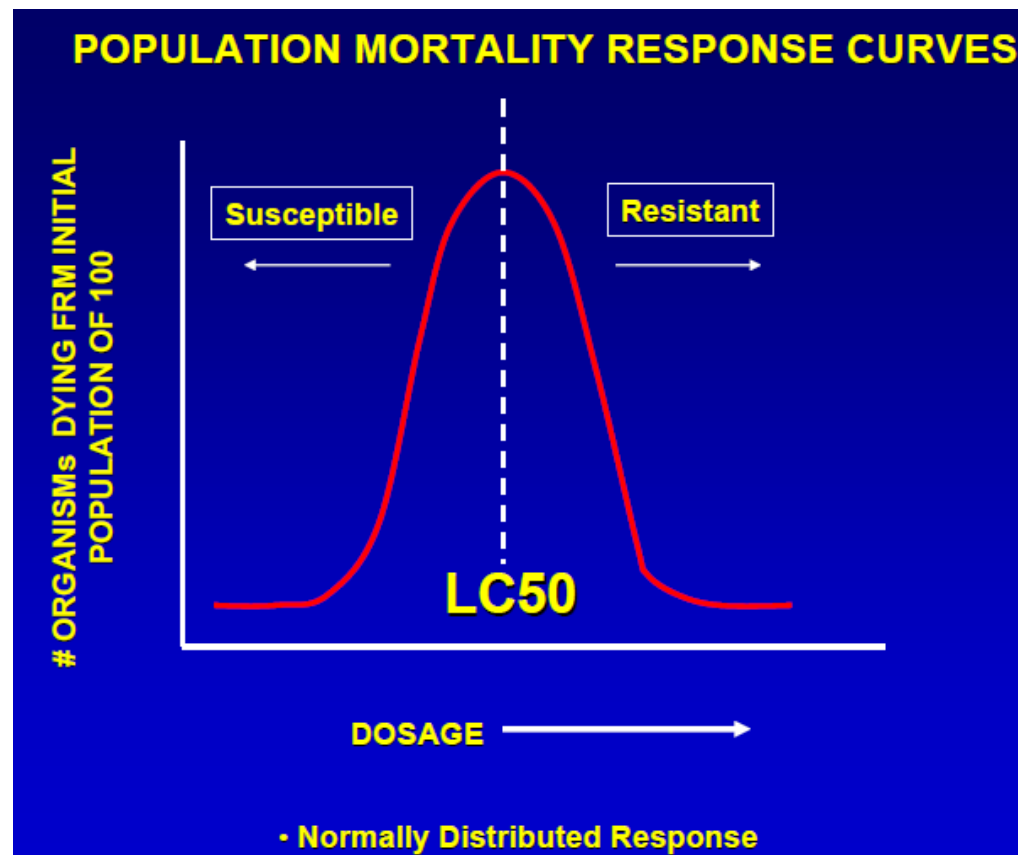
1. Przeliczanie dawek na log (10) dawek (x)
2. Przeliczenie śmiertelności do proporcji
3. Proporcje są korygowane pod kątem umieralności kontrolnej, jeśli jest wyższe niż 10% przy użyciu wzoru Schneider-Orelli (1947):

$$\text{Poprawiona umieralność } (p) = \frac{\text{Poprawiana \% umieralność} - \% \text{ umieralność kontrolna}}{100 - \% \text{ umieralność kontrolna}}$$
4. Przeliczenie skorygowanych proporcji (p) do probitów empirycznych (y).
5. Krzywa odpowiedzi na dawkę jest rysowana przy użyciu dawek log (10) (x) i probitów empirycznych (y) wtedy równanie regresji jest obliczane. Probity empiryczne <1 i >7 są ignorowane, gdyż mają niewielkie znaczenie w oszacowaniu LD lub LC (Hayes, 2014).

$$y = 5 + (x - \mu) / \sigma$$

Algorytm

- Analiza probitowa zakłada, że zależność pomiędzy dawką a odpowiedzią na nią jest zgodna z rozkładem normalnym.



Algorytm

6. Wykonując aproksymację liniową krzywej log10 dawek-probity empiryczne, obliczane są oczekiwane probity (Y_i)
7. Z oczekiwanych probitów (Y_i) wyprowadza się przewidywaną proporcję umieralności
8. Dla pierwotnej umieralności (obserwowanej) i umieralności (oczekiwanej) wykonuje się test Chi-Square o liczbie stopni swobody = (liczba użytych dawek -2) swobody. Jeśli wynik nie jest znaczący, oznacza to dobre dopasowanie krzywej.
9. Następnie wylicza się wartość Z

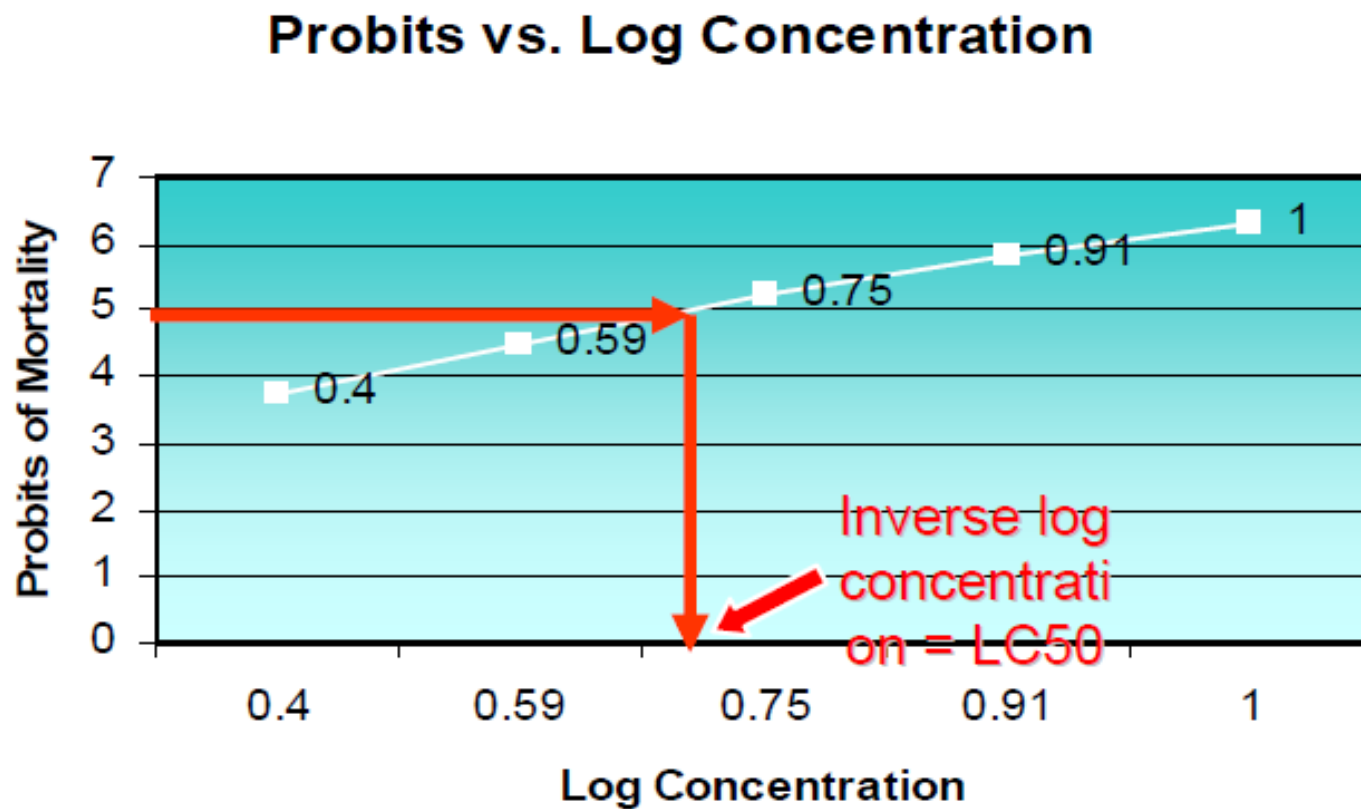
$$Z = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(Y_i - 5)^2}$$

10. Ostateczne współczynniki funkcji probitowej (Y_f) obliczane są z równania regresji w następujący sposób

$$Y_f = Y_i - \frac{P}{Z} - \frac{p}{Z}$$

Gdzie P-oczekiwana, p – obserwowana proporcja umieralności,

Określenie wielkości dawki LC50



Przykłady

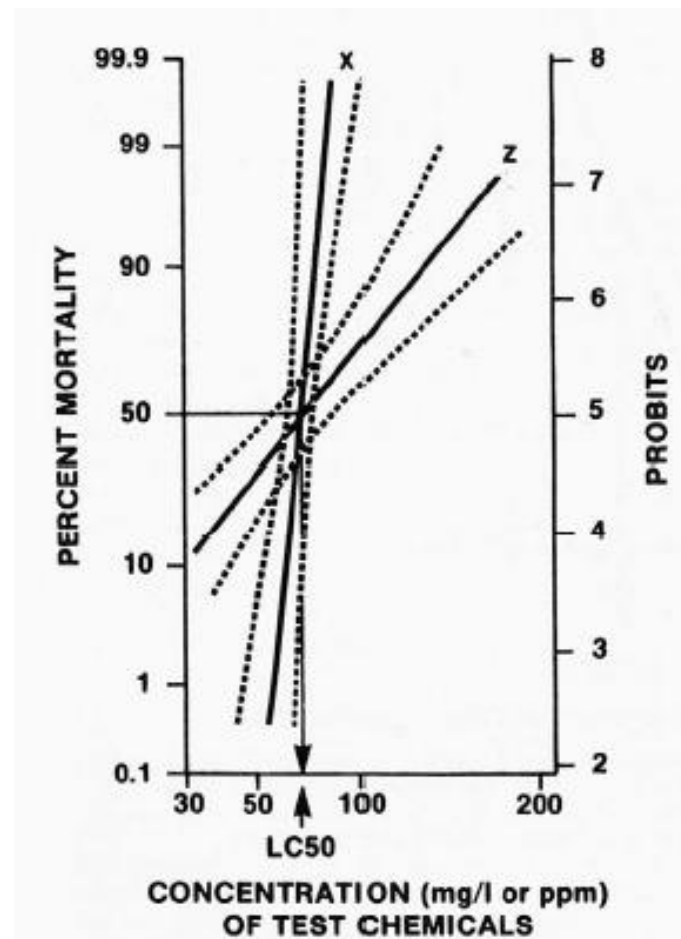
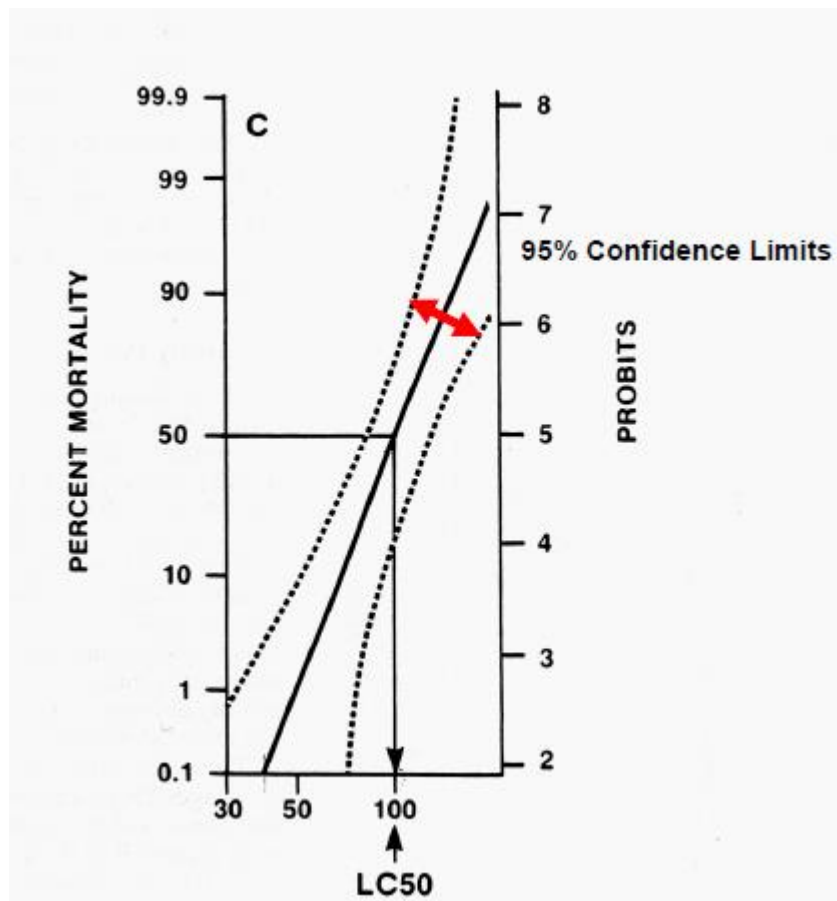


Figure 7. Hypothetical concentration-response curves for two chemicals, X and Z, demonstrating differences in slope.



Dziękuję za uwagę

Literatura:

- Borysiewicz M., Furtek A., Potemski S., *Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi*, Instytut Energii Atomowej Otwock – Swierk, 2000 r.
- Finney, D. J., Ed. (1952). Probit Analysis. Cambridge, England, Cambridge University Press.
- Finney, D. J. and W. L. Stevens (1948). "A table for the calculation of working probits and weights in probit analysis." Biometrika **35**(1-2): 191-201.
- (Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality 31) Bogdan I. Vamanu, Adrian V. Gheorghe, Polinapilinho F. Katina (auth.)-Critical Infrastructures_ Risk and Vulnerability Assessment in Transportation
- Methods of approximation and determination of human vulnerability for offshore major accident hazard assessment, Health and Safety Laboratory, 2013, SPC/Tech/OSD/30, http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/
- Lees F.P. Loss Prevention In The Process Industries: Hazard Identification, Assessment And Control, Third Edition (2005), Ed. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann, Isbn-0750675551