



CHEMIE OVZDUŠÍ

Přednáška č. 9

Organizace studia

- Přednášející: Ing. Marek Staf, Ph.D.
tel. 220 444 458
e-mail marek.staf@vscht.cz
budova A, ústav 216, č. dveří 162
- Rozsah předmětu: zimní semestr
14 přednášek, 14 týdnů, 2 hodiny/týden
- Klasifikace: zkouška - ústní zkouška
- Poznámka: na předmět „Chemie ovzduší“ volně navazuje „Technologie ochrany ovzduší“ ⇒ prolínání obsahu cca 20 %

Osnova přednášky 9

Reakce vybraných polutantů a významných složek atmosféry – látky toxické

- Toxické látky v atmosféře: definice, rozdělení, skupenství
- Právní definice těžkých kovů a těžkých organických látek
- Persistentní organické polutanty: které látky jsou zahrnuty mezi POPs a jaké jsou jejich společné znaky
- Polychlorované bifenyly, kongenery, historie výroby a používání, transport atmosférou
- Organické chlorované pesticidy a polycyklické aromatické sloučeniny
- Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany: jejich syntéza, účinky na zdraví a přírodu, havarijní úniky
- Bojové plyny: rozdělení do kategorií, historie jejich výroby a použití, příklady účinků na zdraví

Rozdělení polutantů

- Polutanty lze dělit do následujících základních skupin:

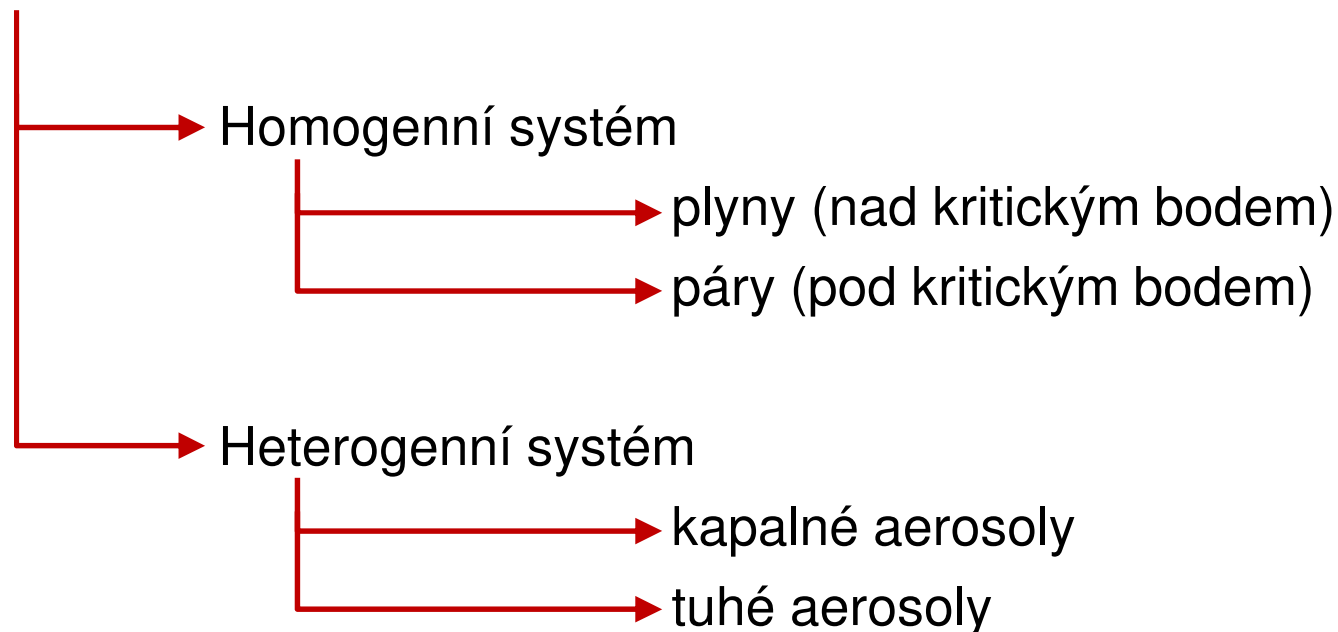
- Látky reagující kyselě - snižující pH atmosféry a následně půdy a vody;
- Látky toxické - chemicky, fyzikálně nebo radioaktivitou poškozující zdraví rostlin a živočichů;
- Látky poškozující O₃ - rozkládající stratosférickou ozonovou vrstvu;
- Skleníkové plyny - látky měnící bilanci absorpce a vyzařování tepla z atmosféry
- Prekurzory - látky, ve výchozí podobě bez nebezpečných vlastností, ale podléhající přeměnám na výše uvedené nebo umožňující jiným látkám se nebezpečně transformovat

Látky s toxickými účinky - obecně

- Největší skupina látek s toxickými účinky, zastoupená v atmosféře – látky organické
- Přítomnost toxických látek v ovzduší – velké riziko pro zdraví
 - 3 hlavní environmentální faktory pro zdraví:
 - Potrava
 - Pitná voda
 - Vzduch
 - 85 % příjmu toxických látek
 - 15 % příjmu toxických látek
 - Problém: potravu + nápoje lze volit, vzduch vdechován v objemu 15 – 20 m³/den (= 18 – 24 kg/den) neovlivnitelně;
- V souvislosti s organickými látkami užívány zejména tyto pojmy:
 - Persistentní organické polutanty POPs;
 - Perzistentní, bioakumulativní a toxické látky PBT;
 - Vysoce perzistentní a vysoce bioakumulativní látky vPvB;
 - Polyaromatické uhlovodíky (Polyaromatic Hydrocarbons) PAHs;
 - Těkavé organické látky (Volatile Organic Compounds) VOC.

Látky s toxickými účinky - obecně

■ Výskyt toxických látek v atmosféře tvoří:



■ Největší latentní nebezpečí = kapaliny a tuhé látky sorbované na prašném aerosolu

- Nosič (carrier) = jakýkoli polétavý prach: saze, pylová zrna, výtrusy, písečná zrna, krystalky soli apod.;
- Vlastní toxická látka, především: POPs, těžké kovy, azbest, radionuklidy aj.

Látky s toxickými účinky - obecně

▪ Definice– toxické látky – komplikované

– Paracelsus (1493 – 1541):

„Všechny sloučeniny jsou jedy. Neexistuje sloučenina, která by jedem nebyla. Rozdíl mezi lékem a jedem tvoří dávka.“



Všeobecná definice:

Látka, která vpravena do organismu nebo na organismus v relativně malém množství a působící chemicky nebo fyzikálně chemicky, je s to vážně poškodit organismus nebo přivodit smrt.

– Právní definice:

viz např. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1272/2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí.



GHS06 – Látky toxické

Pozn. Výstražné symboly dle GHS (Globally Harmonized System of Classification And Labeling of Chemicals; zavedeno OSN)



GHS08 – Látky nebezpečné pro zdraví

Látky s toxickými účinky – těžké kovy

- **Definice – těžké kovy (pozn. v atmosféře zejm. jako aerosoly)**
 - Nejednoznačné definice, spíše historické označení (v podstatě toxické kovy)
 - Starší definice: Všechny kovy, jejichž hustota je větší než Fe (tj. $> 7,86 \text{ g/cm}^3$) \Rightarrow platí pro Cd, Hg, Pb, neplatí pro Se, Al, navíc As není kov ale polokov;
 - Alternativní definice: kritérium hodnocení je hustota $> 5 \text{ g/cm}^3$;
 - Univerzální definice: Těžké kovy jsou všechny kovy či polokovy, které představují hrozbu pro životní prostředí;
 - Nejobvyklejší těžké kovy: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Sb, Se, Tl, Zn.

Látky s toxickými účinky - VOC

- **Definice – Těkavé organické látky (Volatile Organic Compounds) VOC**
 - Více možných definic
 - **Definice dle metody ASTM D3960-90**
Organické látky, mající při 25 °C tlak nasycených par > 13,3 Pa
 - **Dle evropské Směrnice 1999/13/EC „VOC Solvents Directive“**
Organické látky, mající při 20 °C tlak nasycených par > 10 Pa
 - **Dle UN ECE (United Nations Economic Commission for Europe)**
Všechny organické sloučeniny antropogenního původu, jiné než methan, které jsou schopné vytvářet fotochemické oxidanty reakcí s NO_x v přítomnosti slunečního záření. (totéž Směrnice 2001/81/EC nebo 2002/3/EC)

Látky s toxickými účinky - VOC

- **Definice – Těkavé organické látky (Volatile Organic Compounds)**
 - Více možných definic
 - **Definice dle Směrnice 2004/42/ES** o omezování emisí těkavých organických sloučenin vznikajících při používání organických rozpouštědel v některých barvách a lacích a výrobcích pro opravy nátěru vozidel (tzv. „Deco Paints Directive“)

Organické látky, mající při normálním tlaku 101,3 kPa bod varu nižší nebo roven 250 °C.



Látky s toxickými účinky - VOC

■ Emise z průmyslu

- Především uhlovodíková rozpouštědla (barvy, laky, lepidla apod.)
- Emise z řady jiných průmyslových procesů – i neočekávaných
- Příklad: ofsetový tisk novin, časopisů, knih, letáků atd.



Vlhčení v ofsetovém tisku:
roztok s obsahem 2 – 12 % obj.
isopropanolu

Čištění tiskových válců:
směs alifatických uhlovodíků
s bodem vzplanutí 40 – 60 °C

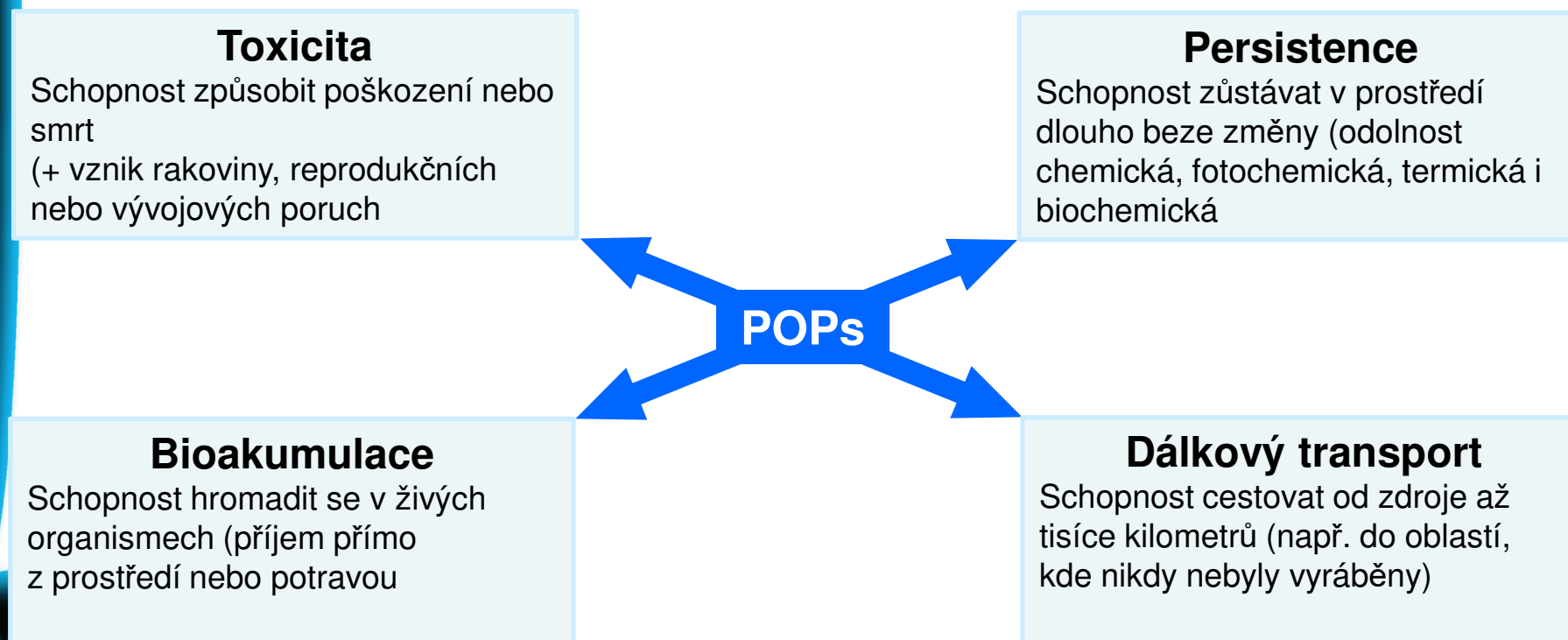
Látky s toxickými účinky - POPs

- **Definice – Perzistentní organické polutanty POPs dle Protokolu o POPs, sjednaného v Aarhusu r. 1998 a dle Stockholmské úmluvy o POPs z r. 2001:** (Zdroj: www.recetox.muni.cz)
 - Persistentní organické polutanty jsou takové organické látky, které:
 - vykazují toxické vlastnosti,
 - jsou persistentní (rychlost degradace v prostředí je malá),
 - se bioakumulují,
 - podléhají dálkovému přenosu v ovzduší přesahujícím hranice států a dochází k depozicím,
 - mají pravděpodobný významný škodlivý vliv na lidské zdraví nebo škodlivé účinky na životní prostředí.

Látky s toxickými účinky - POPs

- **Doplnění definice POPs** (Zdroj: www.recetox.muni.cz)
 - Vyskytují se jako chemické individuum nebo jako směs, tvořící specifickou skupinu tím, že:

- mají podobné vlastnosti a dostávají se do životního prostředí společně;
- směs je dostupná jako určitý technický přípravek.



Látky s toxickými účinky - POPs

▪ Rozdělení persistentních organických polutantů – dle složení

- Polychlorované bifenyly (PCB);
 - Pesticidy, především organické chlorované pesticidy (OCP);
 - Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU);
= Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs);
 - Polychlorované dibenzo dioxiny a dibenzo furany (PCDD);
 - Ostatní perzistentní, bioakumulativní a toxické látky (PBT);
- Pozn. Obvykle druhá generace, tj. náhražky původních vysoce toxických POPs.

Látky s toxickými účinky - POPs

▪ Rozdělení persistentních organických polutantů – dle původu

- Sloučeniny, které byly záměrně vyráběny k nějakému účelu;
především:

Polychlorované bifenyly	PCB
Polychlorované benzeny (rozpouštědla)	PCBz
Polychlorované naftaleny	PCN
Polychlorované fenoly (pentachlorfenol – impregnace dřeva)	PCP
Polybromované difenyl ethery (tzv. bromované zpomalovače hoření)	PBDE
Chlorované parafiny (maziva, rozpouštědla apod.)	CP

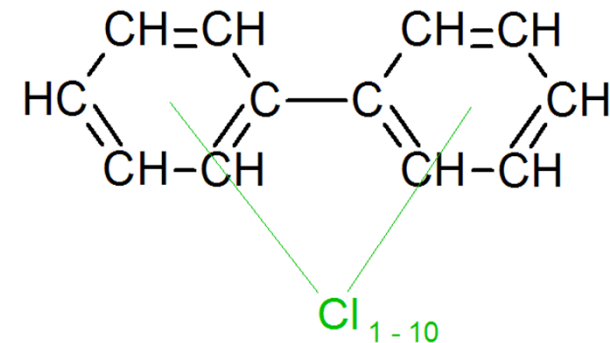
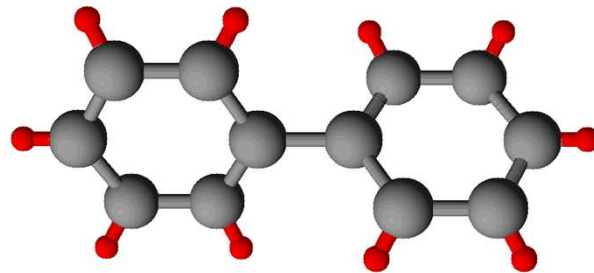
- Sloučeniny, které vznikají jako vedlejší produkty jiných procesů;
především

Polychlorované dibenzodioxiny a furany PCDD/F

Polychlorované bifenyly

■ Obecná charakteristika

- Počet atomů chloru v molekule bifenyly 1 – 10;
- Molekuly různě substituovány, celkem definováno 209 kongenerů;
- Nejvyšší toxicita – tzv. koplanární uspořádání



■ Produkce

- V minulosti masivně produkovány;
- V současnosti výroba až na výjimky zastavena;
- Základní historické použití: teplosměnná média

hydraulické kapaliny (vývěvy, vrtné soustavy); chladivo v transformátorech; dielektrická kapalina v kondenzátorech

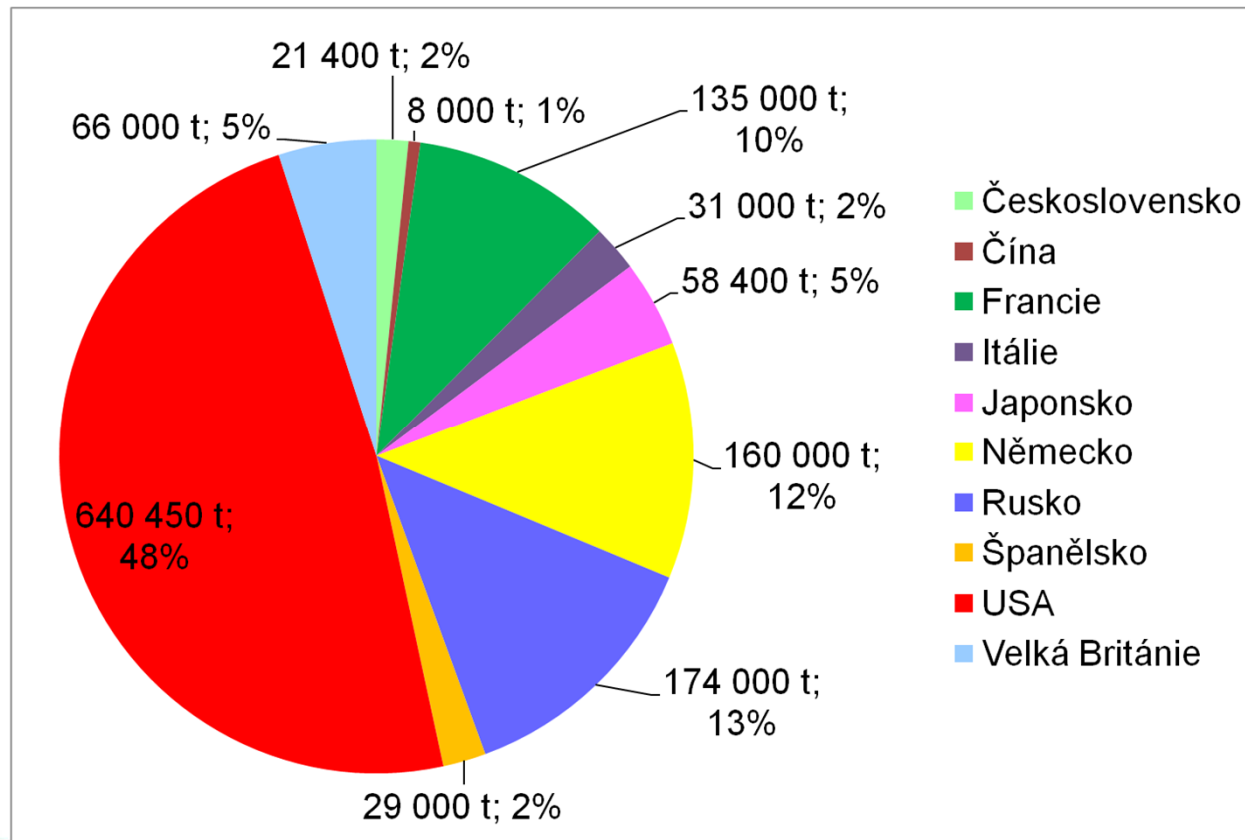
Polychlorované bifenyly

■ Produkce

- Celkem vyrobeno cca $1,7 \cdot 10^6$ tun

■ Transport atmosférou

- vysoký bod varu \Rightarrow ve vzduchu hlavně aerosol, např. nasorbované PCB na prachových částicích



Organické chlorované pesticidy

▪ Charakteristika OCP

- prakticky bez výjimky perzistentní, bioakumulativní a toxické látky;
- většina OCP patří k organochlorovým insekticidům;
- výroba a distribuce je všeobecně zakázána.

▪ Atmosférický výskyt

- obvyklý je výskyt v půdě a vodě \Rightarrow v atmosféře opět ve formě aerosolu (a povrchu prachových částic apod.).

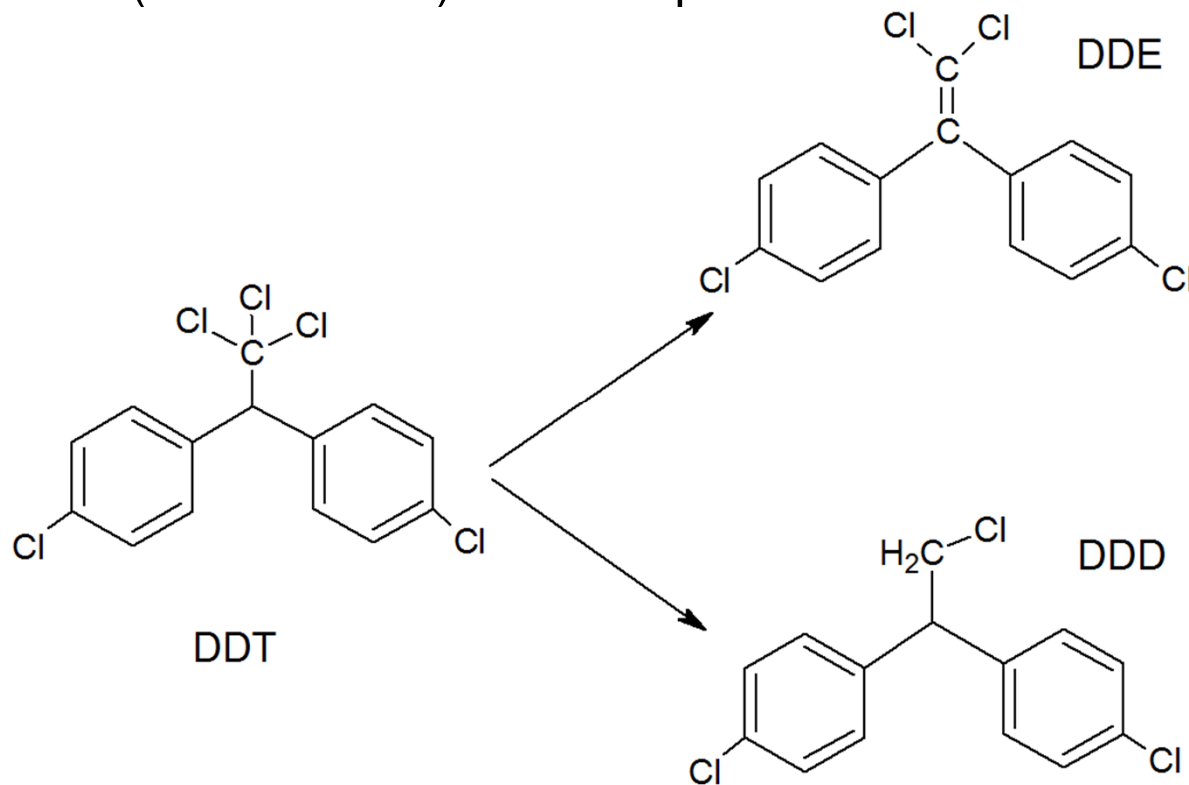
▪ Dříve nejobvyklejší sloučeniny

- DDT 1,1,1-trichlor-2,2-bis(4-chlorfenyl)ethan
 - γ -HCH 1,2,3,4,5,6-hexachlorcyklohexan lindan
(celkem 5 stereoizomerů, z nichž nejvýznamnější α -HCH a β -HCH)
 - CHL cis/trans-1,2,4,5,6,7,8,8-oktachloro-2,3,3a,4,7,7a-
hexahydro-4,7-methano-1H-inden chlordan
 - Aldrin
 - Dieldrin
- } chlorované cyklodienové insekticidy (po Dielsovi a Alderovi)

Organické chlorované pesticidy

■ DDT – odbourávání v přírodě

- velmi pomalý proces (v Československu výroba ukončena 1974, v Rusku 1993), přesto stále detekovány významné koncentrace v ŽP;
- přírodní odbourávání dehydrogenchlorinací a dechlorací
- z poměru koncentrace (DDE + DDD)/DDT lze počítat míru biodegradace:



Organické chlorované pesticidy

■ DDT



INSECTICIDAS
ORION

D.D.T.
Y PELITRE

EXTERMINAN LOS INSECTOS DEL HOGAR

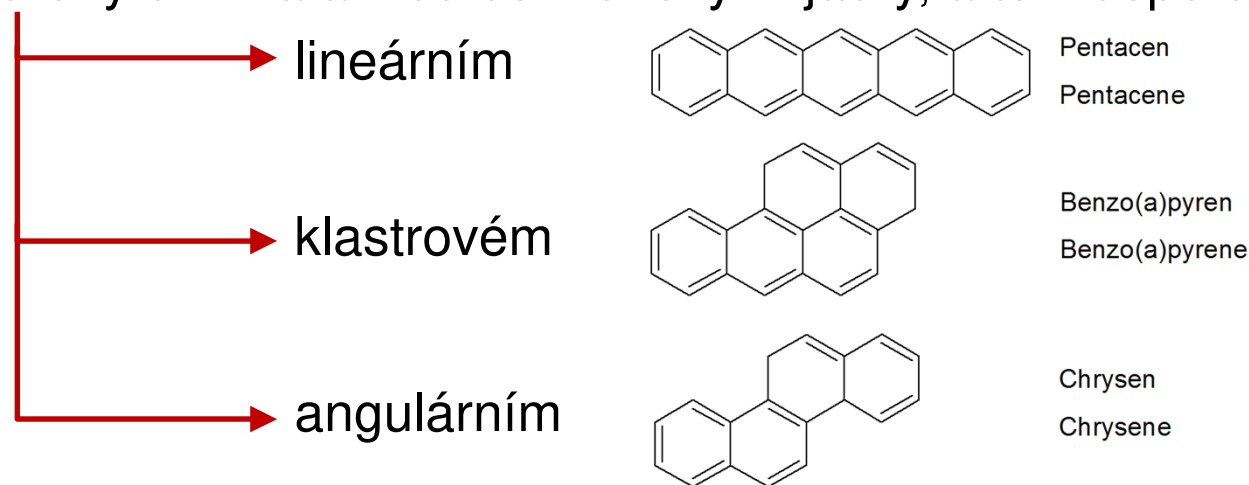
Shortly after its invention in 1939, DDT was promoted as a miracle pesticide all around the world.

The advertisement features a cartoon elephant holding a bottle of Orion insecticide. The bottle is labeled 'INSECTICIDA ORION'. A syringe and some insects are also shown. The text is in Spanish and English.

Polycyklické aromatické uhlovodíky

■ PAU neboli PAH

- méně časté synonymum ještě PAC polycyclic aromatic compounds
- nebo PNA polynuclear aromatics
- tvořeny dvěma a více benzenovými jádry, a to v uspořádání:



- Mezi PAH patří též deriváty: alkyl-, halogen-, nitro-, amino-, hydroxy-
- Mimořádně toxický benzo(a)pyren – silně karcinogenní a mutagenní: vznik nedokonalým spalováním (300 až 600 °C) objeven r. 1933 v černouhelném dehtu a identifikován jako jeden z prvních karcinogenů (demonstrováno potíráním kůže potkanů dehtem).

Polycyklické aromatické uhlovodíky

■ PAU neboli PAH

– Emise do ovzduší:

Spalovací procesy – přítomné v dehtu a sazích (hutě, teplárny)

Spalovací motory – zejm. vznětové

Lokální topeniště (pro vnitřní prostředí a zdraví nebezpečné svíčky, grilované a smažené potraviny apod.)



PCDD a PCDF

■ Polychlorované dibenzo dioxiny a polychlorované dibenzo furany

– Příklad tetrachlordibenzoparadioxin ($LD_{50} = 10^{-9}$ x tělesná hmotnost)

– Příklad havarijního úniku do atmosféry:

Seveso 1976 – havárie provozu firmy Givaudan (součást Hoffmann-La Roche)

Výroba herbicidu TCP (trichlorfenol) \Rightarrow selhání procesu výroby, hromadění TCDD v reaktoru a následné odpuštění 2 kg TCDD do atmosféry;

Závada odstraněna do 20 minut, přiznání úniku TCDD až po 17 dnech \Rightarrow

Přenos TCDD deštěm do půdy

Kontaminace rozsáhlého území

250 případů hospitalizace

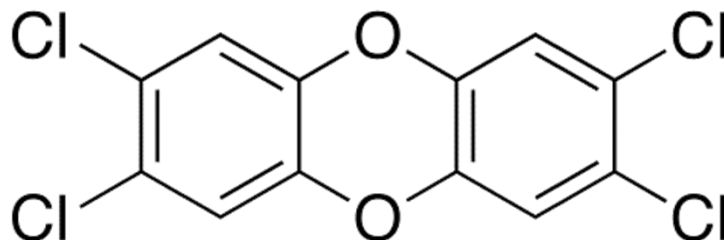
Evakuace 600 osob + následné zdravotní následky

PCDD a PCDF

- Polychlorované dibenzo dioxiny a polychlorované dibenzo furany

- Průběh havárie:

- Výroba herbicidu TCP (2,4,5 – trichlorfenol) k likvidaci dřevnatých plevelů
- Vedlejší produkt syntézy TCP je TCDD, tj. 2,3,7,8-tetrachloro dibenzodioxin



- Výrobní reaktor nutné trvale míchat a zabránit přehřátí
- Sobota 10. 7. 1976, dle italské legislativy nařízena víkendová odstávka výroby
- Personál nedodržel postup odstávky – odstaveno míchání před dochlazením systému
- V nádrži směs TCP a NaOH – rozvoj exotermické reakce – zvýšení tlaku

PCDD a PCDF

- **Polychlorované dibenzo dioxiny a polychlorované dibenzo furany**
- **Průběh havárie:**
 - Překročení nastavené hodnoty tlaku na pojistném ventilu – otevření
 - Únik až 6 t materiálu obsahujícím cca 1 – 2 kg TCDD
 - Rozptyl horkého aerosolu na ploše 18 km²
 - Vlivem nepříznivého větru zanesení oblaku k městu
 - Ve výrobním závodě porucha odstraněna cca za 20 – 30 minut
 - Úřady managementem nebyly informovány o obsahu TCDD v uniklém aerosolu – nebyla nařízena okamžitá opatření
 - Až po hlášených obtížích u obyvatelstva zřízení vládní komise a 14 dní po havárii evakuace osob do 4 km od závodu
 - Následně označeno více než 1 000 hektarů polí za vysoce kontaminované
 - Areál podniku zabezpečen ostnatým drátem a po dobu 5 let dekontaminován a kompletně likvidován

PCDD a PCDF

- Seveso – město na severu Itálie, firma Givaudan



14 000 obyv.

Poloha:

20 km severně

od Milána

PCDD a PCDF

■ PCDD – následky havárie v Seveso

Okamžitý úhyn ptactva zasaženého ve vzduchu oblakem

Na ploše 5 x 0,7 km úhyn cca 3 000 všech druhů zvířat (zejm. ovce)

Následně utraceno 80 000 zasažených hospodářských zvířat



PCDD a PCDF

■ PCDD – následky havárie v Seveso



Typické postižení kůže
PCDD – rozvoj chlorakné



PCDD a PCDF

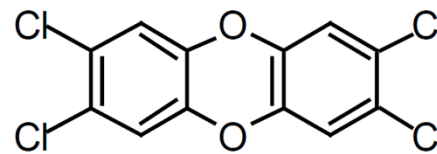
■ PCDD – následky havárie v Seveso

- U zasaženého obyvateľstva projevy akútnej otravy: bolesti hlavy, dýchací potíže a svědění pokožky – posléze silná vyrážka a puchýře – rozvoj chlorakné u několika set lidí, po čase u cca 200 lidí těžké poškození jater a ledvin (cirhóza, jaterní karcinomy)
- 600 lidí trvale sterilních, u desítek těhotných žen nutná interrupce z důvodu poškození plodu

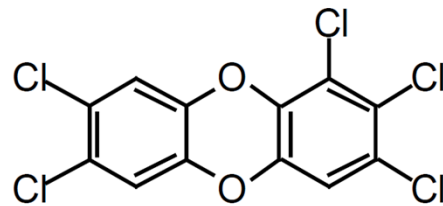
PCDD a PCDF

■ Vznik PCDD a PCDF při spalování (zejm. odpadu)

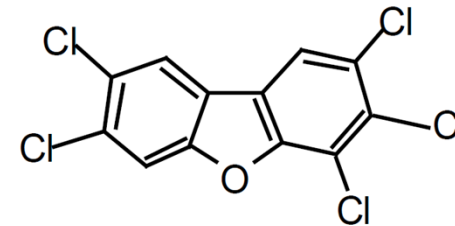
- Vysoce toxické, karcinogenní, mutagenní a teratogenní látky ⇒ velmi nízký emisní limit $0,1 \text{ ng.m}_n^{-3}$ TEQ (na obr. jsou 3 nejtoxičtější)



2,3,7,8,-TCDD



1,2,3,7,8,-pentaCDD



2,3,4,7,8,-pentaCDF

- Při spalování rozklad halogenderivátů, ale následná syntéza PCDD/F při chladnutí spalin ⇒ teplotní okno 200 – cca 450°C (až 600 °C).

PCDD a PCDF

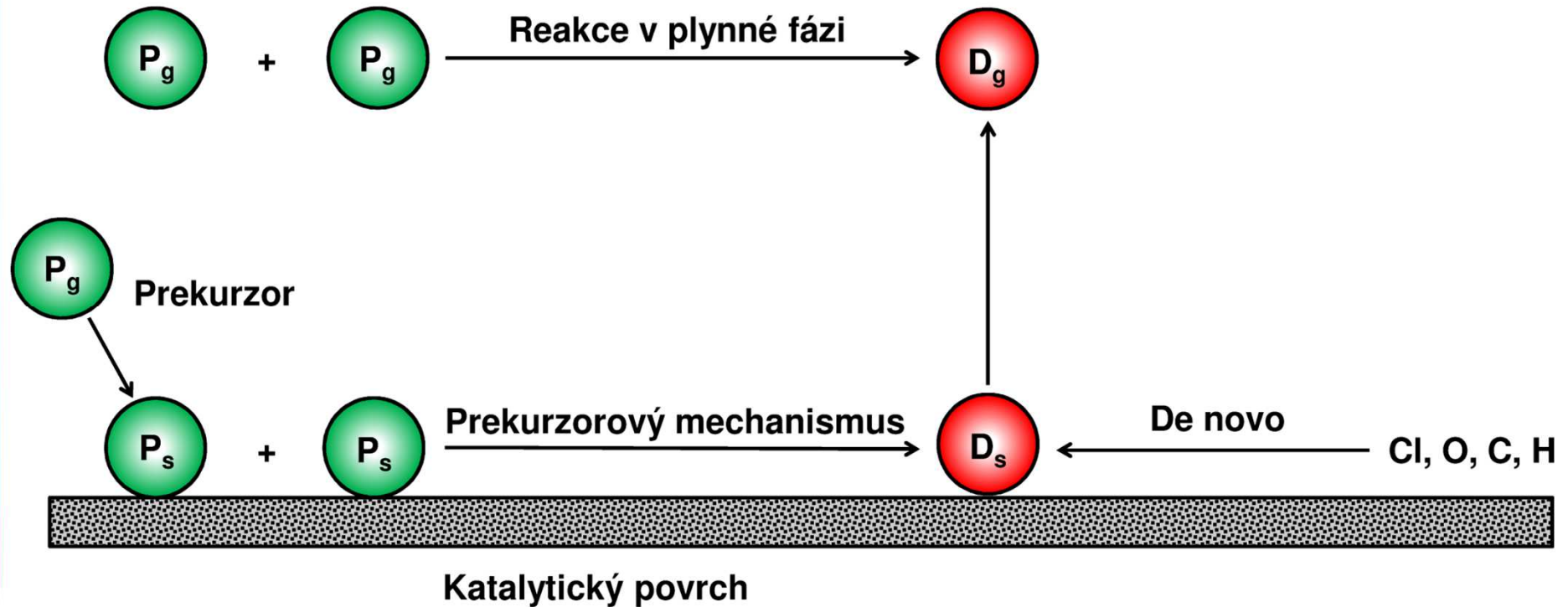
■ Vznik PCDD a PCDF při spalování (Zdroj: Konduri & Altwicker 1994)

- Dioxiny vznikají v plynné fázi, nebo katalyticky na tuhém povrchu.
- Reakce na tuhém povrchu považovány za hlavní zdroj dioxinů při spalovacích procesech.
- Pro katalyzovaný povrchový děj byly navrženy 2 mechanismy:
 - Mechanismus přes prekurzory;
 - Syntéza de novo;
- Prekurzorový mechanismus uvažuje reakci chlorovaných uhlovodíků (chlorbenzeny a chlorfenoly).
- De novo syntéza pracuje s rekombinací uhlíku, kyslíku, vodíku a chloru.
- Poměr pyrosyntetického děje v plynné fázi, prekurzorového mechanismu a de novo syntézy není přesně kvantifikován.

PCDD a PCDF

■ Vznik PCDD a PCDF při spalování (Zdroj: Konduri & Altwicker 1994)

- Obecně platí: mechanismus přes prekurzory je primární a probíhá za vyšších teplot;
de novo syntéza následuje za nižších teplot;

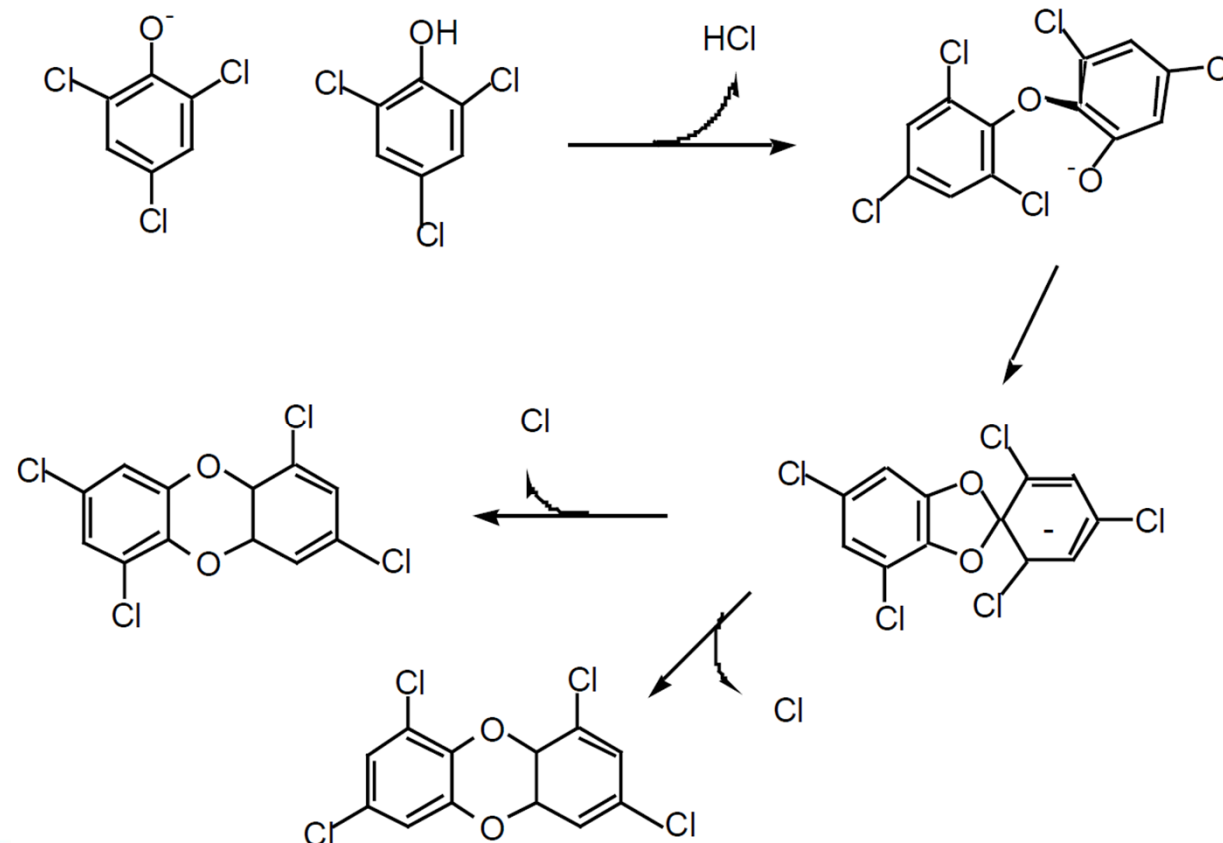


PCDD a PCDF

■ Vznik PCDD a PCDF při spalování

- Prekurzorový mechanismus (více možností);
- Reakce přes vznik chlorovaného fenolátu (Zdroj: Tuppurainen et al 1998):

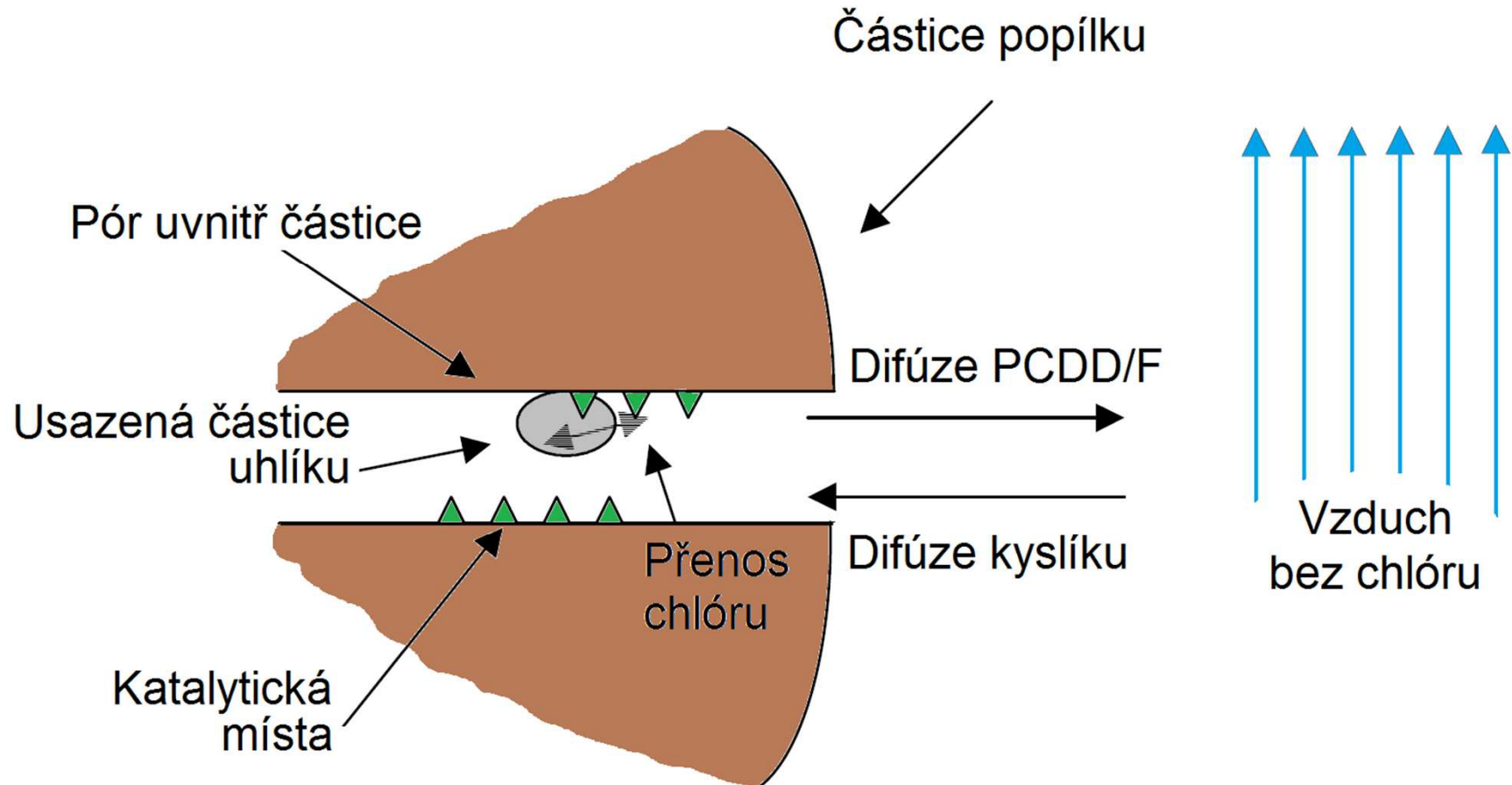
Pozn. Nejen při spalování, viz ekologická zátěž PCDD ve firmě Spolana Neratovice z výroby pentachlorofenolu



PCDD a PCDF

■ Vznik PCDD a PCDF při spalování

- De novo syntéza;
- Silný katalytický účinek Cu
- Maximum vzniku při teplotě 325 °C (Zdroj: Milligan and Altwicker 1995):



Bojové plyny







■ Historie

- Písemné prameny již ze starověku (Zdroj: www.population-protection.eu)
Příklad: V roce 178 n. l. potlačení povstání rolníků v Číně pomocí nespecifikované mlhy s obsahem arseniku (As_2O_3);

- Masivní nasazení v 1. světové válce (Zdroj: www.valka.cz)

Odhadem zasaženo 1 297 000 lidí, z toho 91 200 mrtvých

Použito celkem:

→ Německo	68 000 tun		
→ Francie	36 000 tun		
→ Velká Británie	25 000 tun.		

- Zákaz používání: Ženevský protokol (1925) a následně Úmluva o zákazu vývoje, výroby, hromadění zásob a použití chemických zbraní a o jejich zničení (1993).

Bojové plyny - přehled

Skupina látek	Příklady		
Slzotvorné	brombenzylkyanid (BA) chlorpikrin (PS) 2-chlor-benzalmalononitril (CS)		chloracetofenon (CN) 1-brom-2-propanon (BA) dibenz[b,f][1,4]oxazepin (CR)
Vyvolávající zvracení	adamsit difenylkyanoarsan		difenylchlorarsan
Poškozující krevtvorbu	arsan (AsH_3) chlorovodík		kyanogen chlorid kyanovodík
S účinkem na respirační systém	chlor difosgen oxid dusičitý perfluoroisobutylen		fosgen červený fosfor kyselina chlorsulfonová TiCl_4 ZnO_2
Inhibitory přenosu kyslíku	kyanovodík		sulfan
Zpuchýřující	yperit lewisite fosgen	ethyldichlorarsan dusíkatý yperit fosgen oxim	methyldichlorarsan fenodichlorarsan sesquiyperit
Nervově paralytické	sarin soman	cyklohexylsarin tabun	diisopropyl-fosfluoridát GE, VE, VG, V-Gas, VM, VX

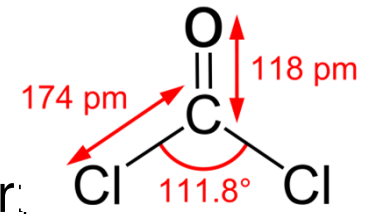
Bojové plyny – posloupnost výroby

Období		Látka
1. světová válka	1915	chlor, fosgen, benzylbromid, xylylbromid
	1916	difosgen, dibrommethylethylketon, chloropirkin, yperit
	1917	difenylchlorarsan
	1918	difenylkyanoarsan, ethyldichloroarsan, dichlormethylether
Meziválečné období	1930	První nervově paralytické látky (Německo)
2. Světová válka	1941 – 1945	CO, HCN v koncentračních táborech
	1942 – 1945	vyrobena 12 000 tun tabunu, nepoužito
	1944 – 1945	sarin, soman + 200 dalších organofosfátů, nepoužito
Poválečné období	1955	skupina látek agent V (USA)
	1958	VX (USA)
	1979 - 1988	yperit, Irán vs. Irák
	2013 (?)	yperit, sarin Sýrie (?)

Bojové plyny – výběr nejznámějších

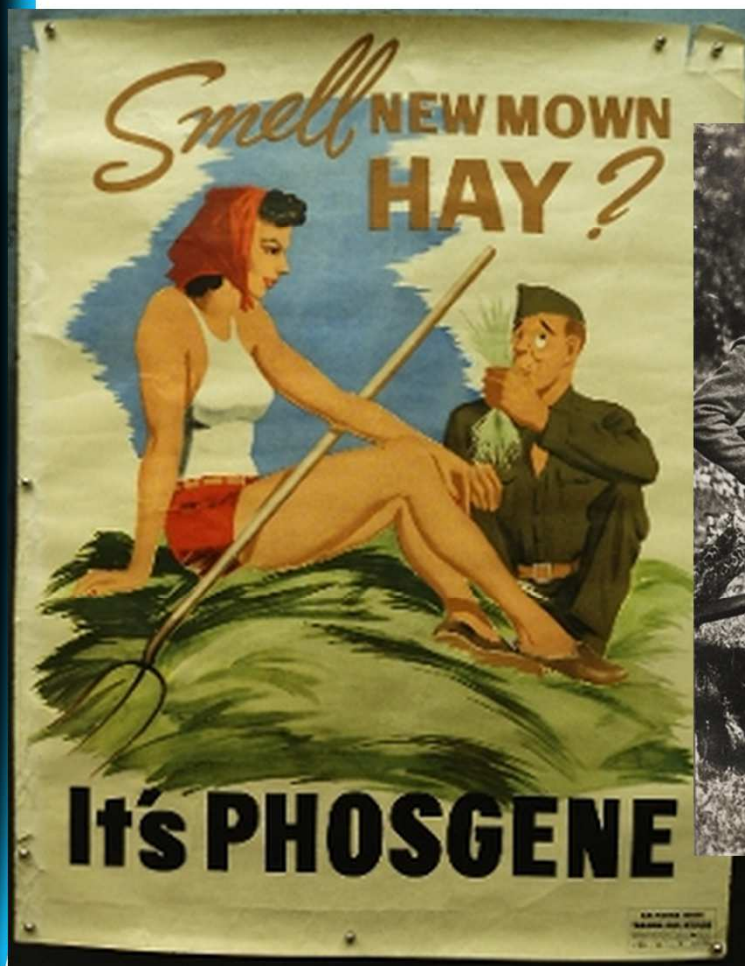
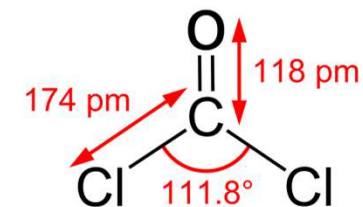
■ Fosgen (dichlorid karbonylu, karbonyldichlorid aj.)

- Dusivý a toxický bezbarvý plyn;
- Po silném zředění zápach sena nebo shnilých brambor;
- Výroba přímou syntézou $\text{CO} + \text{Cl}_2$ za teploty $130 - 150\text{ }^\circ\text{C}$ a katalýzy aktivním uhlím nebo Pt houby;
- Atmosférický vznik fotolýzou chlorovaných uhlovodíků (CH_2Cl_2 , CCl_4 apod.);
- Mechanismus otravy: v plicích hydrolýza na $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{HCl} \Rightarrow$ následně porušení membrán v plicních sklípcích a vznik edému
- Život bezprostředně ohrožující obsah $> 50\text{ ppm}_v$, přičemž obsah $500 - 800\text{ ppm}$ smrtelný při expozici $< 1\text{ min.}$
- Civilní použití: surovina pro organické syntézy
- Vojenské použití: 1. světová válka, zejm. dělostřelecké granáty plněné sloučeninou



Bojové plyny – výběr nejznámějších

- Fosgen (dichlorid karbonylu, karbonyldichlorid aj.)
 - dobové obrázky

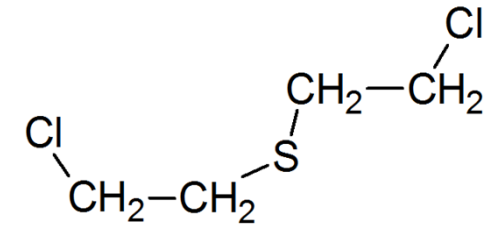


„Cítíš čerstvé seno? ... To je fosgen“

Bojové plyny – výběr nejznámějších

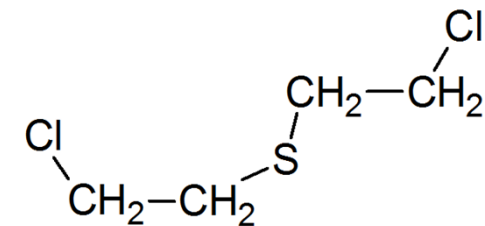
■ Yperit; bis(2-chlorethyl)sulfid (mustard gas)

- Při 20 °C bezbarvá olejovitá kapalina bez zápachu (pach po hořčici z důvodu nedostatečné čistoty při výrobě)
- Mechanismus otravy: průnik do organismu všemi branami, v místě kontaktu vyvolání morfologických změn ve tkáních zánět a nekrosa;
- Příznaky: nedráždí ihned
Účinek až po latentní době; zprvu deprese stavy, bolest hlavy, slabost, zvýšení teploty, kolísavý krevní tlak i tep;
posléze červené zbarvení kůže a otok, do 24 hodin puchýře s rozvojem až 6 dní s rizikem infekce;
Při vniknutí do očí mohutný otok víček, poškození rohovky
- Bojová aplikace: rozptyl aerosolu výbuchem granátu apod.
- Civilní aplikace: není vyráběn a používán.



Bojové plyny – výběr nejznámějších

- Yperit; bis(2-chlorethyl)sulfid (mustard gas)
 - dobové obrázky



Účinky yperitu

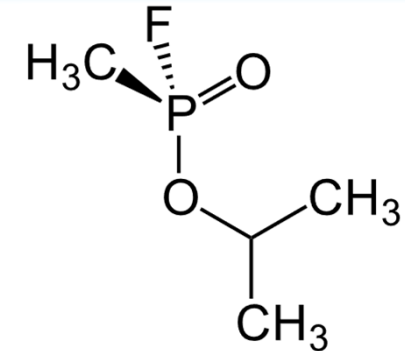


Dobový ochranný oděv

Bojové plyny – výběr nejznámějších

■ Sarin; O-isopropylmethyl fluorofosfonát

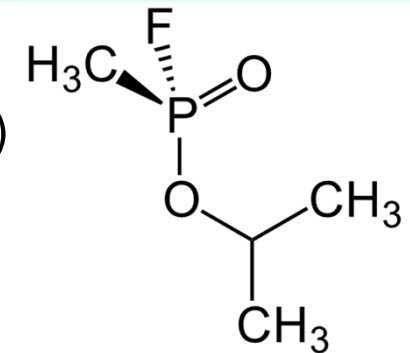
- neurotoxin ze skupiny organofosfátů
- Při 20 °C bezbarvá těkavá kapalina s vůní ovoce
- Syntetizován v Německu v r. 1939 týmem:
Schrader, Ambros, Ritter, Van der Linde.
- Výroba: syntéza isopropanolu s methyldifluorofosfátem (CH₃POF₂).
- Mechanismus otravy: průnik do organismu všemi branami, včetně neporušené kůže, bez žádných místních příznaků
následně inhibice cholinesterázy s následnou akumulací acetylcholinu ⇒ porucha přenosu nervového impulsu;
- Příznaky zasažení: bolest hlavy, mióza, poté slinění a dýchací potíže; následně zrychlené dýchání, záškuby a křeče; v posledním stadiu ztráta vědomí, pomočení, defekace, obrna dýchacích svalů a smrt
- Bojová aplikace: rozptyl aerosolu nebo jako binární chemická zbraň se syntézou z prekurzorů in-situ
- Civilní aplikace: není vyráběn a používán.



Bojové plyny – výběr nejznámějších

- Sarin; O-isopropylmethyl fluorofosfonát

- dobové obrázky (Tokyo; útok sekty Óm šinrikjó; 1995)



Šókó Asahara, vůdce sekty



první pomoc zasaženým (12 mrtvých + 5 500 intoxikovaných)