



TECHNOLOGIE OCHRANY OVZDUŠÍ

Přednáška č. 10

- Přednášející: Ing. Marek Staf, Ph.D.

tel. 220 444 458; e-mail marek.staf@vscht.cz

budova A, ústav 216, č. dveří 162

Často používané zkratky



- SKO Spalovna komunálního odpadu
- SNO Spalovna nebezpečného odpadu
- MSW Municipal Solid Waste (tuhý komunální odpad)
- TKO Tuhý komunální odpad
- MWC Municipal Waste Combustor (spalovna komunálního odpadu)
- HWI Hazardous Waste Incinerator (spalovna nebezpečného odpadu)
- **ZEVO Zařízení na energetické využití odpadu**
- TEQ Toxic Equivalent (toxický ekvivalent – pro přepočet obsahu PCDD a PCDF)

Co je de iure spalovna odpadu



■ Zákon č. 201/2012 Sb.

- Definice vycházející ze zákona
- Tepelným zpracováním odpadu se rozumí oxidace odpadu nebo jeho zpracování jiným termickým procesem, včetně spalování vzniklých látek, pokud by tím mohlo dojít k vyšší úrovni znečišťování oproti spálení odpovídajícího množství zemního plynu o stejném energetickém obsahu.

Spalovna odpadu = stacionární zdroj

→ **určený** k tepelnému zpracování odpadu, jehož hlavním účelem není výroba energie ani jiných produktů

→ ve kterém více než 40 % tepla vzniká tepelným zpracováním nebezpečného odpadu

→ ve kterém se tepelně zpracovává neupravený směsný komunální odpad.

Co vzniká spalováním TKO?



- Široká škála sloučenin od neškodných po nebezpečné

Spaliny z TKO

Standardní produkty dokonalého spalování

Oxid uhličitý

Vodní pára

Znečišťující látky vzniklé při dokonalém spalování

Oxid siřičitý

Oxidy dusíku

Halogenovodíky (zejm. HCl, HF)

Těkající těžké kovy (zejm. Hg)

Popílek (vč. těžkých kovů)

Znečišťující látky vzniklé při nedokonalém spalování

Oxid uhelnatý

Uhlík (saze)

Uhlovodíky (vč. aromatických)

Deriváty uhlovodíků (vč. halog.)

Měření emisí ze spalování odpadu



- **Zákon č. 201/2012 Sb. (příloha č. 4)**
 - Kontinuální měření emisí:
 - Provádí stacionární zdroj, ve kterém je tepelně zpracován odpad, pro:
 - 1) NO_x
 - 2) CO
 - 3) tuhé znečišťující látky
 - 4) plynné anorganické sloučeniny Cl
 - 5) plynné anorganické sloučeniny F
 - 6) SO_2

Měření emisí ze spalování odpadu



■ Vyhláška č. 415/2012 Sb.

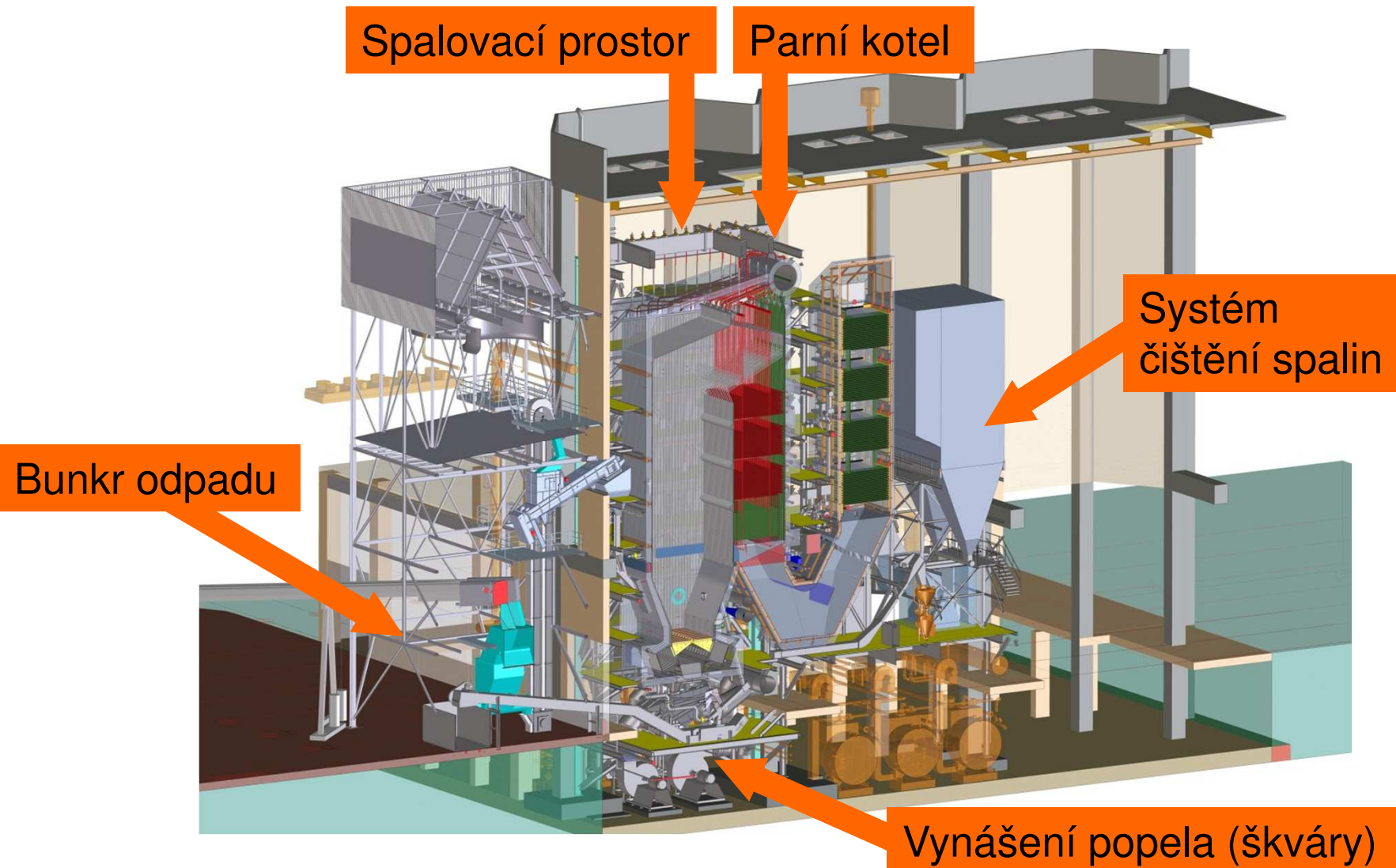
- Jednorázová měření
- Nejméně dvakrát za rok v intervalech ne kratších než 3 měsíce
 - 1) Cd + Tl a jejich sloučeniny
 - 2) Hg a její sloučeniny
 - 3) Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V a jejich sloučeniny
 - 4) polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany

Pravidla provozu spaloven



- **Aby byla zajištěna především destrukce PCDD/F a PAU**
 - Teplota spalin těsně u stěny dohořívací komory min. 850 °C;
 - Obsah kyslíku za posledním přívodem vzduchu min. 6 % obj.
 - Doba zdržení spalin za výše uvedených podmínek min. 2 s;
 - Pozor ! Je-li spalován pentachlorfenol (v jakékoli koncentraci) nebo chlorované látky > 1 % hm. \Rightarrow T zvýšena na min. 1100 °C;

Základní princip funkce ZEVO



Jak se spaluje komunální odpad?



- TKO = značně heterogenní materiál \Rightarrow fluidní a práškové spalování není vhodné
- Pro TKO se užívá především spalování na rošttech

Rošty pro spalování TKO

Pevný rošt

Pásový rošt

Válcový rotační rošt

Vratisuvný rošt

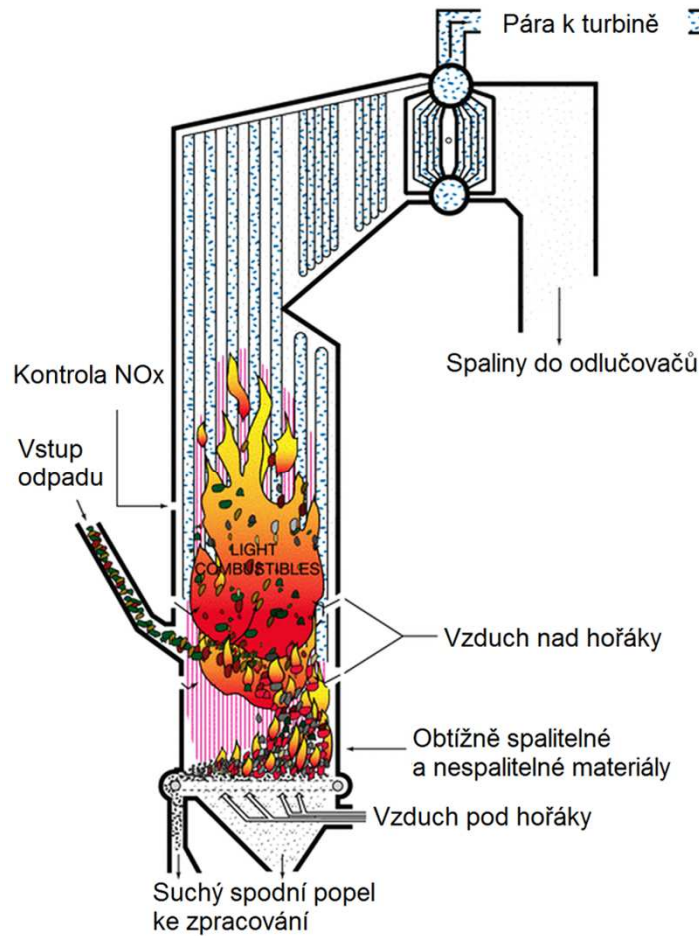
užíváno v ČR

Rotační pec

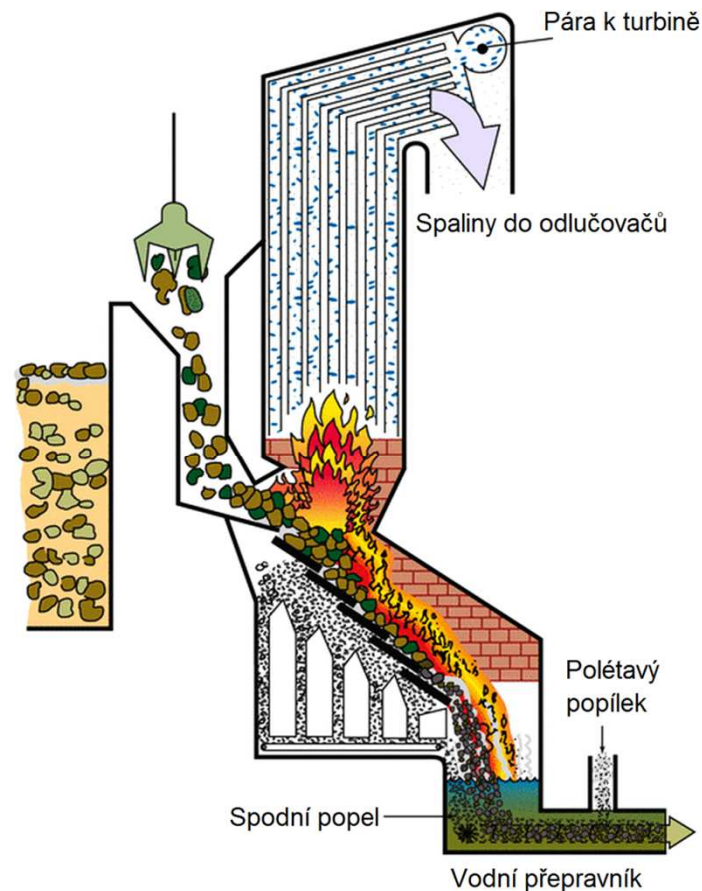
Jak se spaluje komunální odpad?



■ Typy roštů (grates) (Zdroj: Springer)



— Pásový rošt (traveling g.)

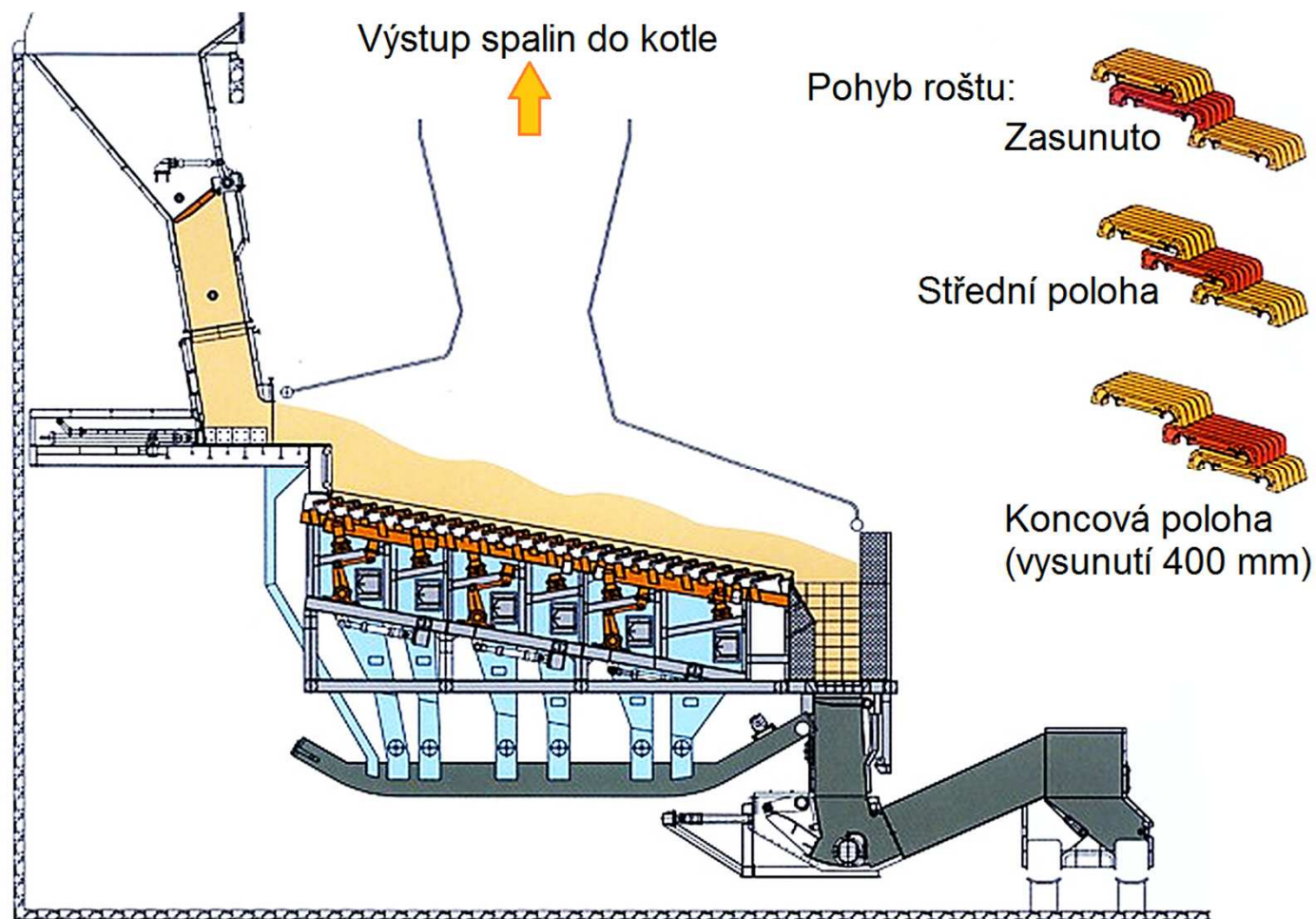


Vrátisuvný rošt (reciprocating/step g.)

Jak se spaluje komunální odpad?



■ Mechanismus vratisuvného roštu (Zdroj: MHPS Group)



Příklady roštů v zařízeních ZEVO



- Příklad válcového roštu



Příklady roštů v zařízeních ZEVO



- Příklad vratisuvného roštu



Jednotky ZEVO na našem území



- V roce 2022 v provozu pouze čtyři zařízení:

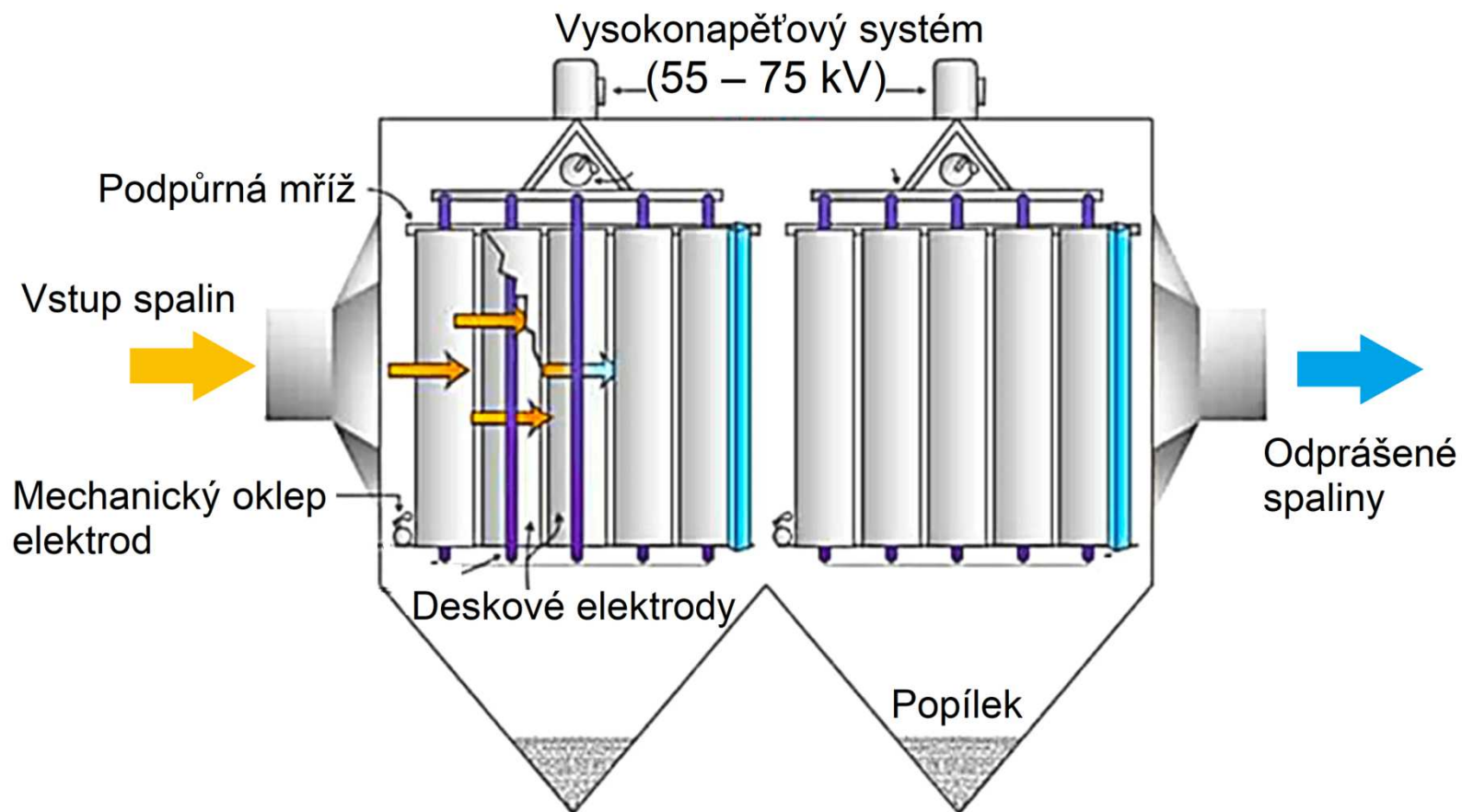
- **ZEVO Malešice** (Pražské služby, a.s.)
 - 4 linky, jmenovitá kapacita $4 \times 15 \text{ t}_{\text{TKO}} \cdot \text{h}^{-1} = 60 \text{ t}_{\text{TKO}} \cdot \text{h}^{-1}$
- **Spalovna komunálních odpadů Liberec** (Termizo a.s.)
 - 1 linka, jmenovitá kapacita $12 \text{ t}_{\text{TKO}} \cdot \text{h}^{-1}$
- **ZEVO Brno** (SAKO Brno, a.s.)
 - 2 linky, jmenovitá kapacita $2 \times 16 \text{ t}_{\text{TKO}} \cdot \text{h}^{-1} = 32 \text{ t}_{\text{TKO}} \cdot \text{h}^{-1}$
- **ZEVO Chotíkov** (Plzeňská teplárenská, a.s.)
 - 1 linka, jmenovitá kapacita $12 \text{ t}_{\text{TKO}} \cdot \text{h}^{-1}$

Odlučování prachu ve spalovnách



■ Elektrostatické odlučovače

- obvykle 5 sekcí (4 činné + rezerva), teplota max. 350 °C, na hraně emisního limitu \Rightarrow do budoucna neudržitelné

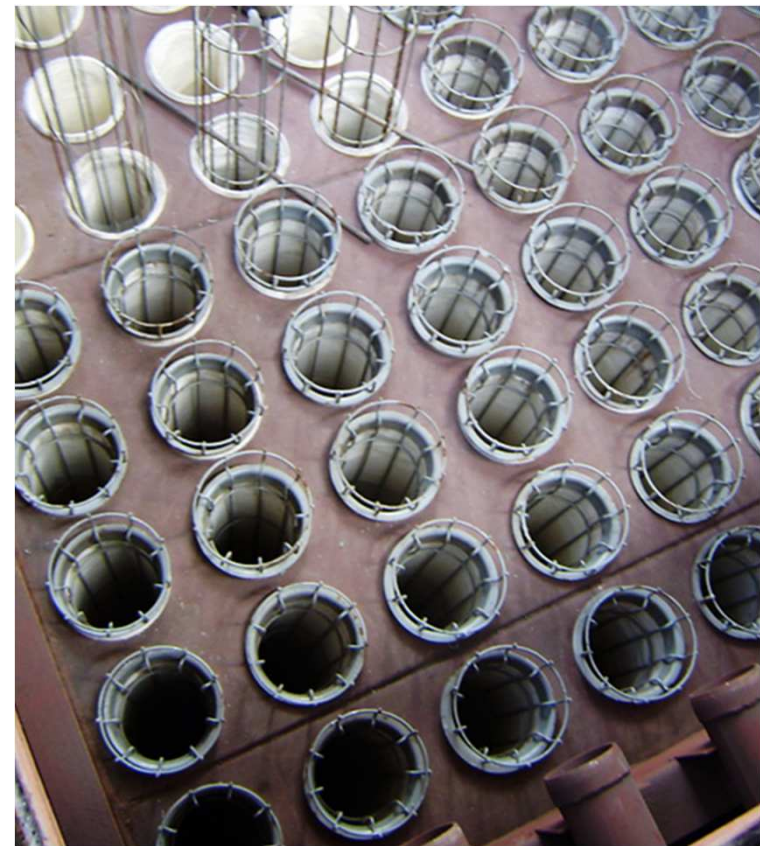


Odlučování prachu ve spalovnách



■ Tkaninové filtry

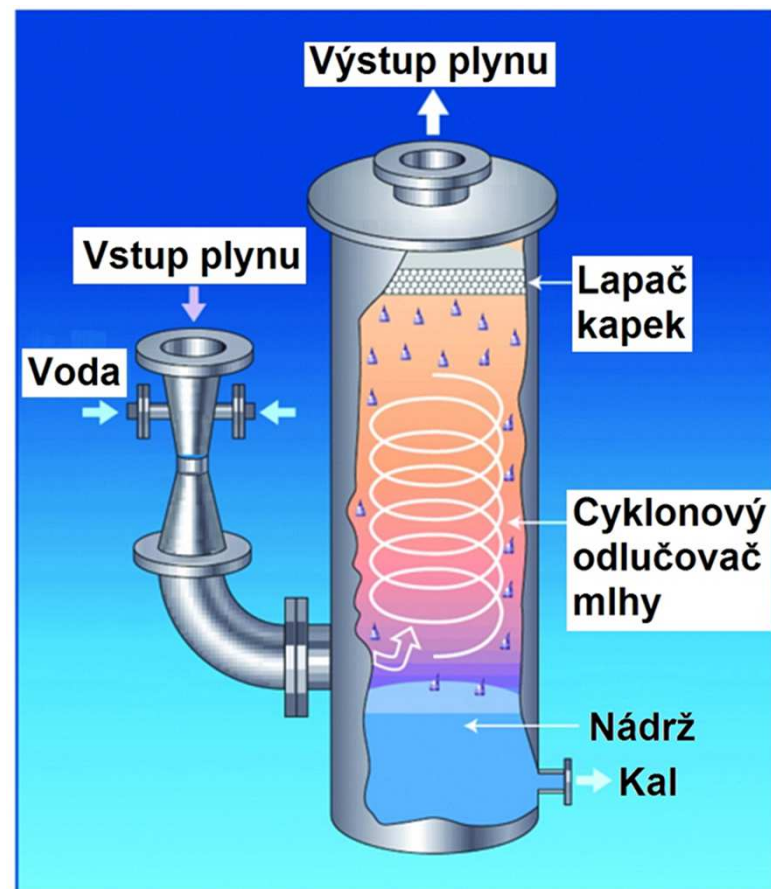
- Účinnost vyšší než 99 %
- Perspektivní řešení
- Materiál expandovaný teflon
- Teplota plynu max. 250 °C
- Spolehlivě plní emisní limit
- Problém se zanášením (pozor na vlhkost)
- Velká tlaková ztráta
- Náročné na elektrický ventilátor



Odlučování prachu ve spalovnách



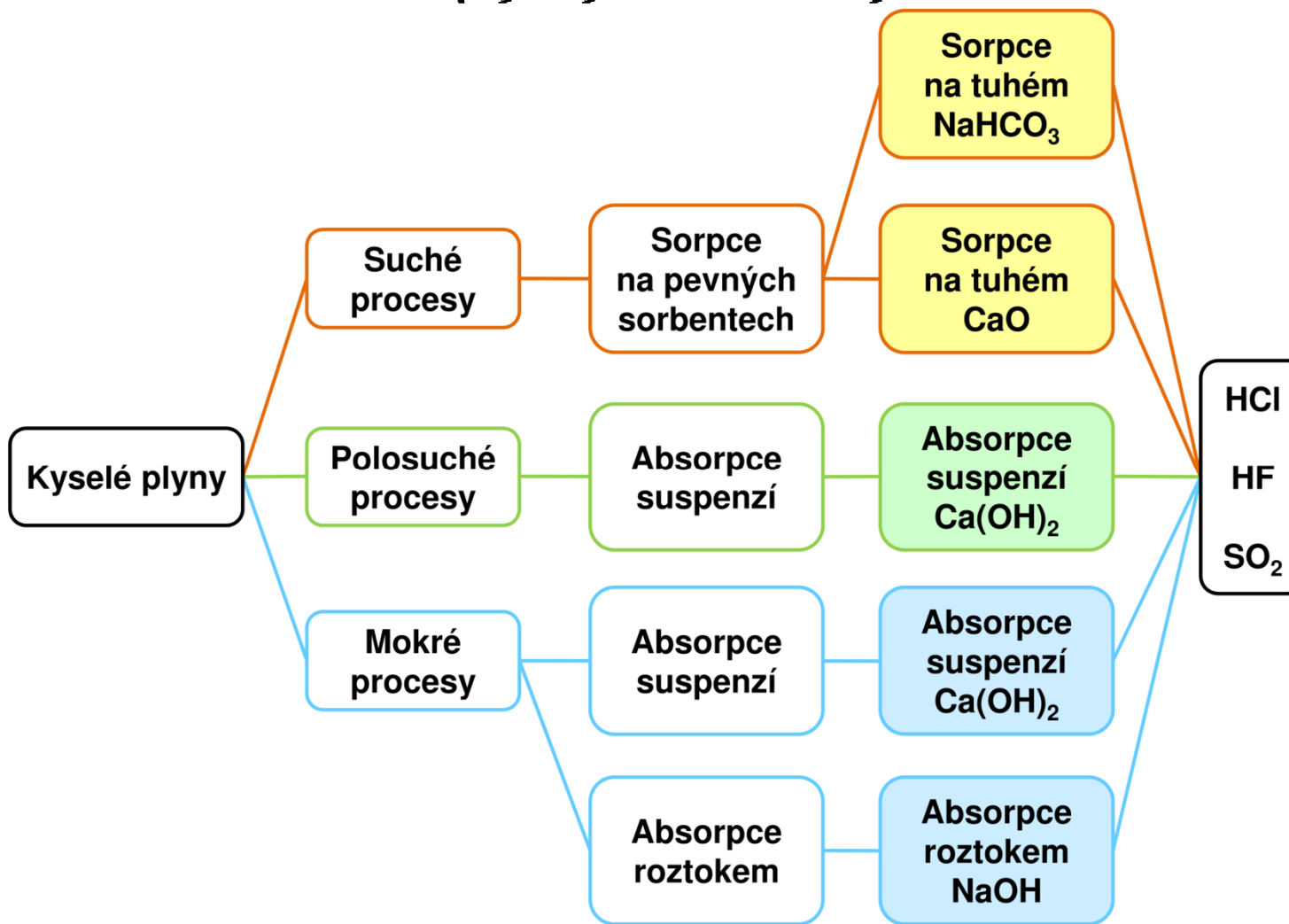
- **Mokré Venturiho pračky**
 - Účinnost podstatně vyšší než 99 %
 - Méně časté řešení
 - Účinné i pro částice $10^{-1} \mu\text{m}$
 - Prudké chlazení plynu
 - Spolehlivě plní emisní limit
 - Náročné na vodní hospodářství
 - Často řazeny **do série**
 - Problém s tvorbou úsad



Odlučování kyselých plynů



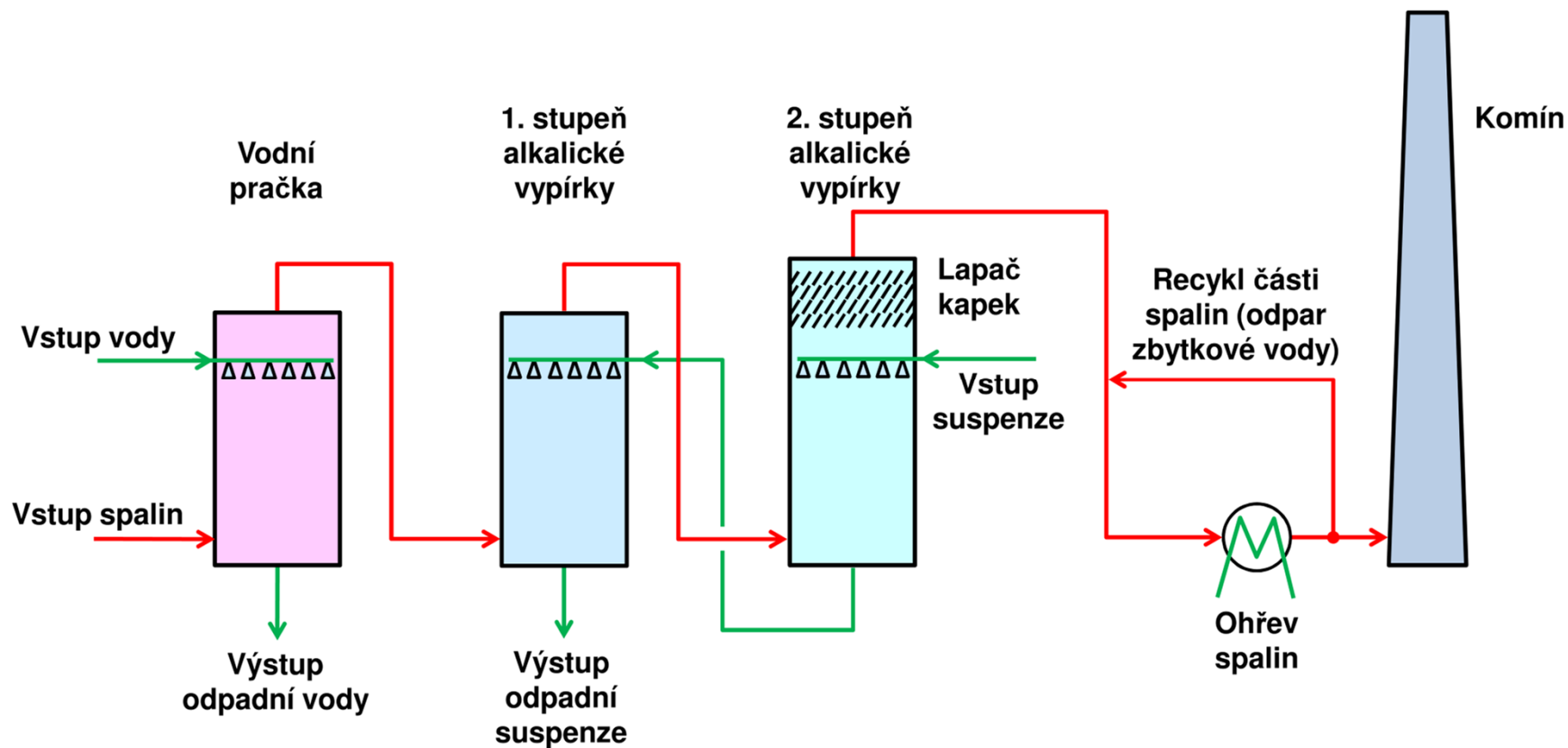
Možnosti odlučování plynných znečišťujících látek



Příklad odlučování kyselých plynů



- Mokrý postup vypírání kyselých plynů (HCl , HF , SO_2)

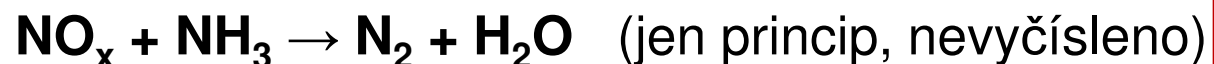


Odstraňování oxidů dusíku

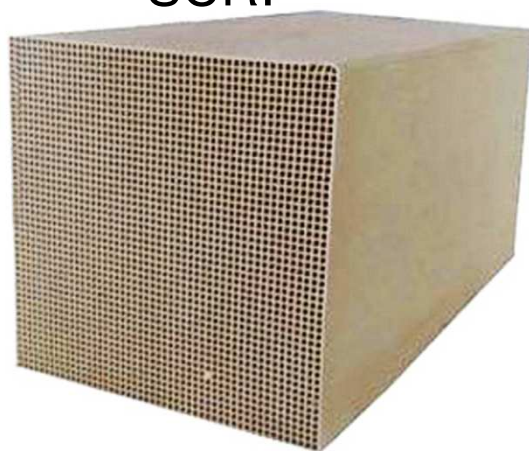


■ Podmínky provozování DeNO_x systémů ve spalovnách TKO

- Používána selektivní nekatalytická redukce a selektivní katalytická redukce



- SNCR: nástřík NH₃ nebo CO(NH₂)₂ do dohořívací komory, tj. do pásma teplot 800 – 1 000 °C;
- SCR: použití katalyzátoru V₂O₅ + MoO₃ na keramickém nosiči TiO₂ nebo Al₂O₃, za teplot 300 – 350 °C ⇒ metoda účinná i pro PCDD/PCDF

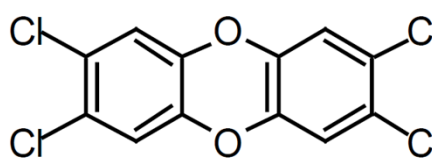


PCDD a PCDF – zásadní problém

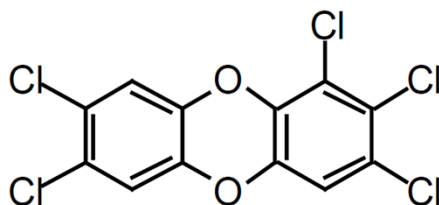


■ Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu

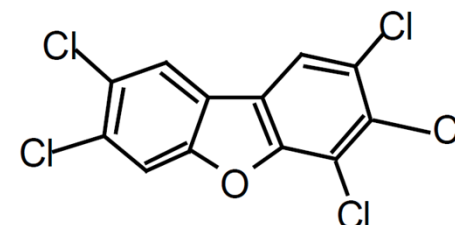
- Vysoce toxické, karcinogenní, mutagenní a teratogenní látky \Rightarrow velmi nízký emisní limit $0,1 \text{ ng.m}_n^{-3}$ TEQ (na obr. jsou 3 nejtoxičtější)



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 \Rightarrow teplotní okno $200 - \text{cca } 450^\circ\text{C}$ (až 600°C).

PCDD a PCDF – zásadní problém



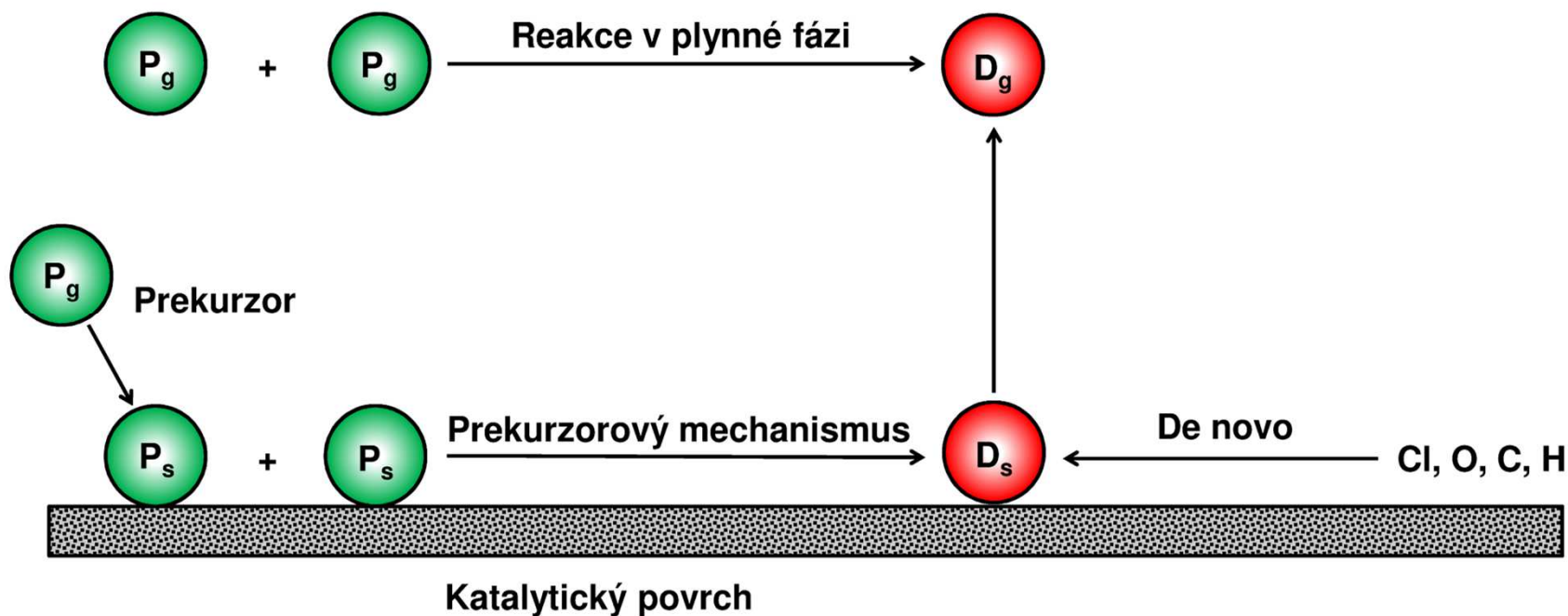
- **Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu** (Zdroj: Konduri & Altwicker 1994)
 - Dioxiny vznikají v plynné fázi, nebo katalyticky na tuhém povrchu.
 - Reakce na tuhém povrchu považovány na hlavní zdroj dioxinů při spalovacích procesech.
 - Pro katalyzovaný povrchový děj byly navrženy 2 mechanismy:
 - 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.

PCDD a PCDF – zásadní problém



- **Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu** (Zdroj: Konduri & Altwicker 1994)

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

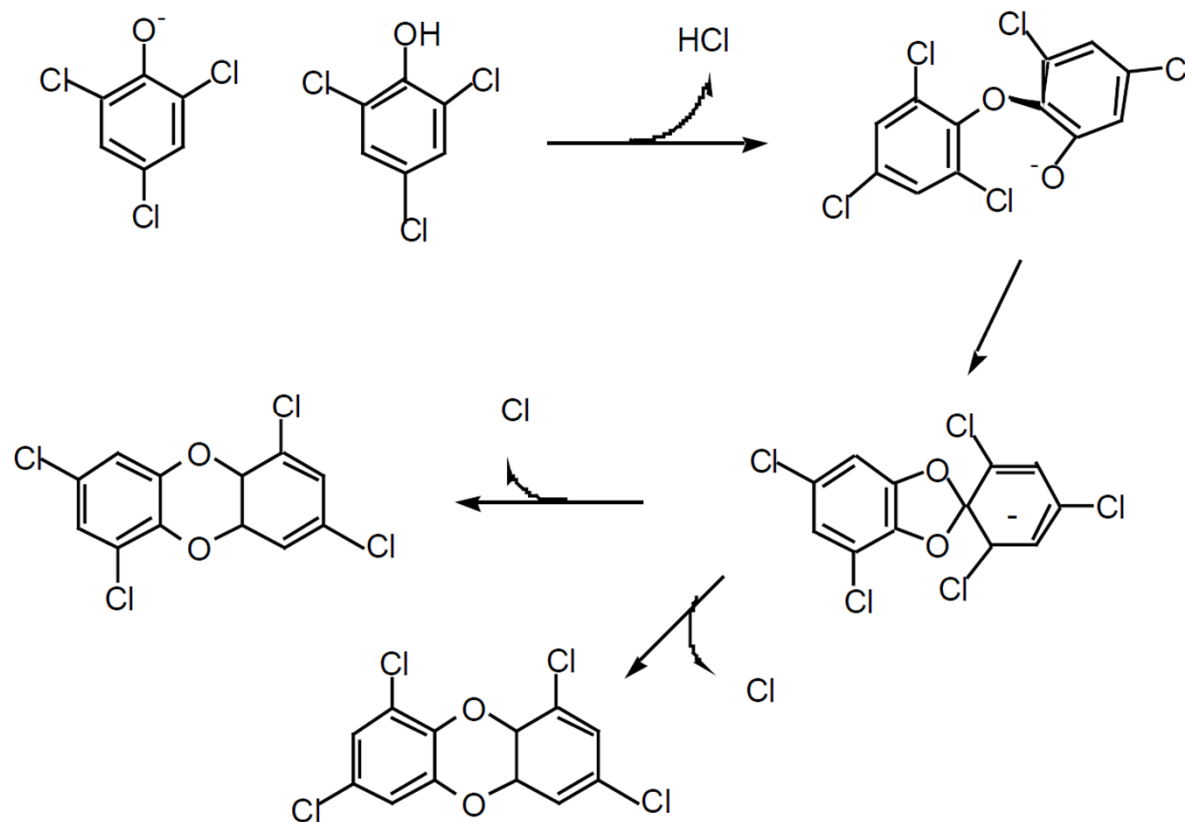


PCDD a PCDF – zásadní problém



■ Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu

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



PCDD a PCDF – zásadní problém



■ Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu

- Prekurzorový mechanismus – katalytické vlivy prvků v popílku

(Zdroj: Hinton & Lane 1991):

Hliník

negativní efekt

Chlor

žádný efekt

Uhlík

žádný efekt

Měď

silně pozitivní efekt

Draslík

pozitivní i negativní dle situace

Sodík

pozitivní i negativní dle situace

Síra

pozitivní efekt

Zinek

pozitivní efekt

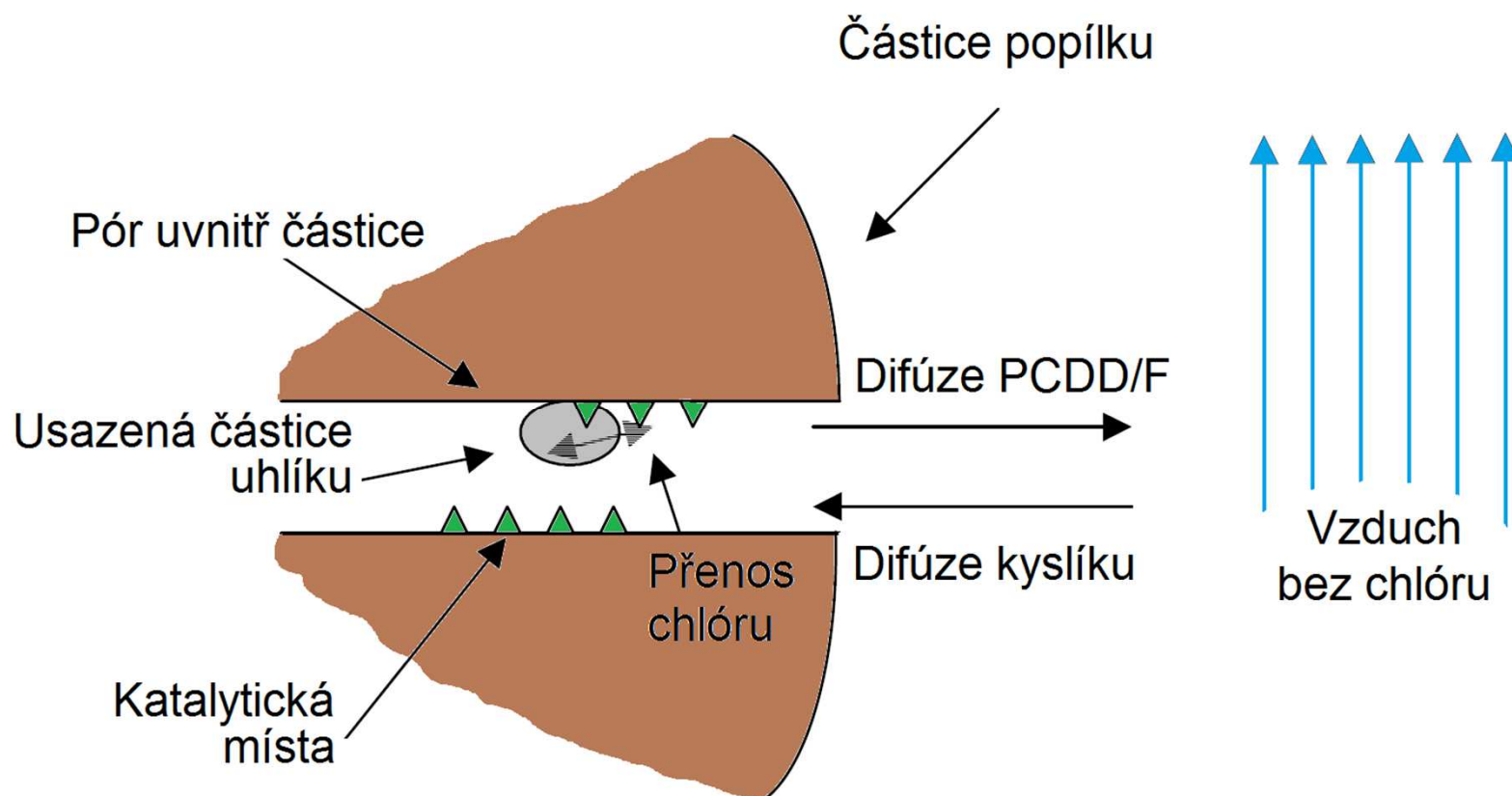
Další faktory (adsorpční
povrch, velikost částic)

žádný efekt

PCDD a PCDF – zásadní problém



- **Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu**
 - De novo syntéza;
 - Maximum vzniku při teplotě 325 °C (Zdroj: Milligan and Altwicker 1995):



PCDD a PCDF – zásadní problém



■ Vznik PCDD a PCDF při spalování odpadu

- De novo mechanismus – katalytické vlivy prvků v popílku (Zdroj: Hinton & Lane 1991):

Hliník	negativní efekt
Chlor	pozitivní
Uhlík	žádný efekt
<u>Měď</u>	<u>silně pozitivní efekt</u>
Draslík	pozitivní efekt
Sodík	pozitivní efekt
Křemík	negativní efekt
<u>Síra (nízký poměr Cl/S)</u>	<u>silně negativní efekt</u>
Síra (vázaná v popílku)	pozitivní efekt
Cín	pozitivní efekt
Zinek	pozitivní efekt

PCDD a PCDF – zásadní problém



■ Metody zachytu PCDD a PCDF při spalování odpadu

- Velmi rychlé ochlazení spalin (30 milisekund) pod teplotu 400 °C nebo lépe mimo dioxinové okénko < 200 °C;
- Sorpční systémy užívající aktivní uhlíkaté materiály
- Selektivní katalytická redukce – kromě NO_x dochází účinně i k odbourání PCDD/F;
- Katalytické tkaninové filtry – katalyzátor nanesen na vnitřní povrch filtrační tkaniny (např. typ Remedial D/F Catalytic Filter System)
 - funguje při teplotě 180 – 260 °C
 - filtrační tkanina expandovaný PTFE
 - umožňuje redukci z 10 na < 0,1 ng.m_n⁻³ TEQ .

PCDD a PCDF – zásadní problém



■ Sorpční záchyt PCDD a PCDF při spalování odpadu

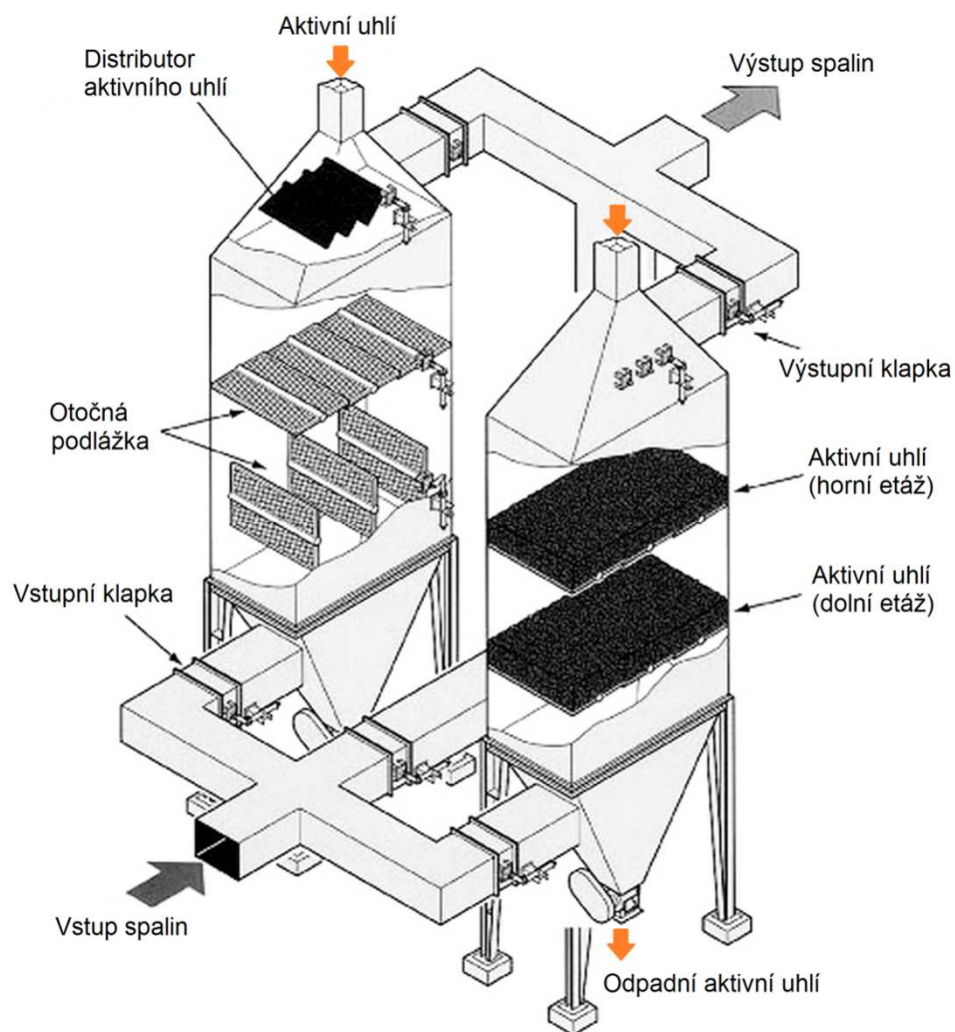
- Funguje černouhelný aktivní koks (dražší) i hnědouhelný polokoks.
- 3 možnosti aplikace:
 - Samostatný reaktor s pevným ložem (malé spalovny)
 - aplikován zrnitý adsorbent;
 - Samostatný reaktor se sesuvným ložem (velké spalovny)
 - aplikován zrnitý adsorbent;
 - Nástřík adsorbentu před tkaninový odlučovač
 - aplikován práškový adsorbent;
- Po použití adsorbent spálen spolu s TKO;
- Metoda funguje i na těkavé těžké kovy (zejm. Hg a Cd).

PCDD a PCDF – zásadní problém



■ Sorpční záchyt PCDD a PCDF při spalování odpadu

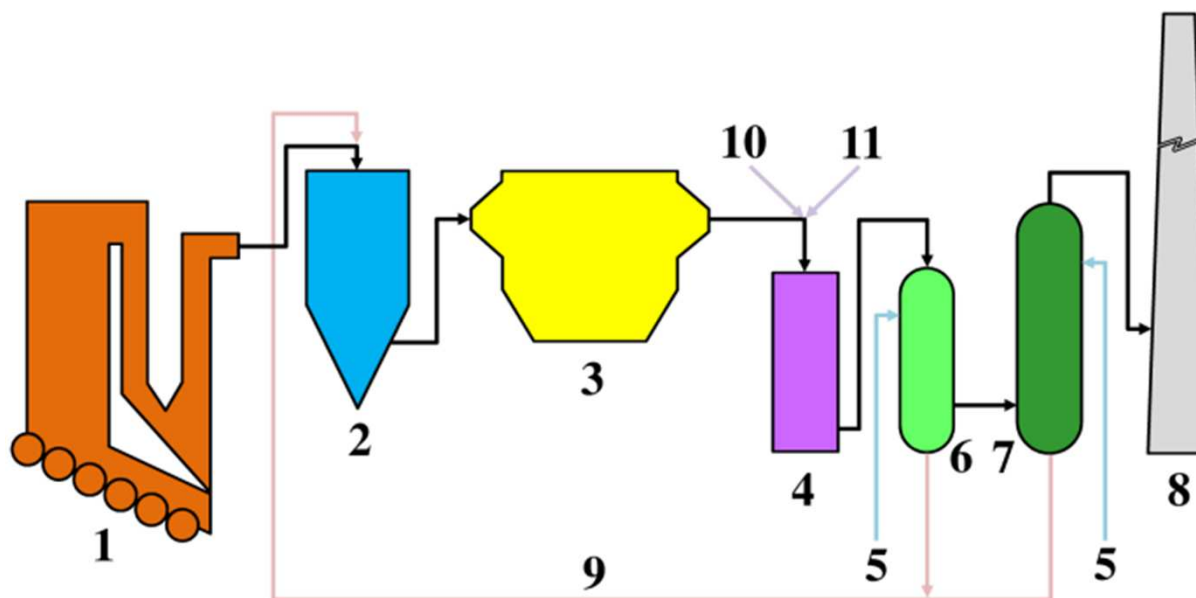
- Dvoupatrový adsorbér s pevným ložem



Jednotky ZEVO na našem území



- Každé ze 4 zařízení ZEVO má jiný systém čištění spalin
ZEVO Malešice (Pražské služby, a.s.)

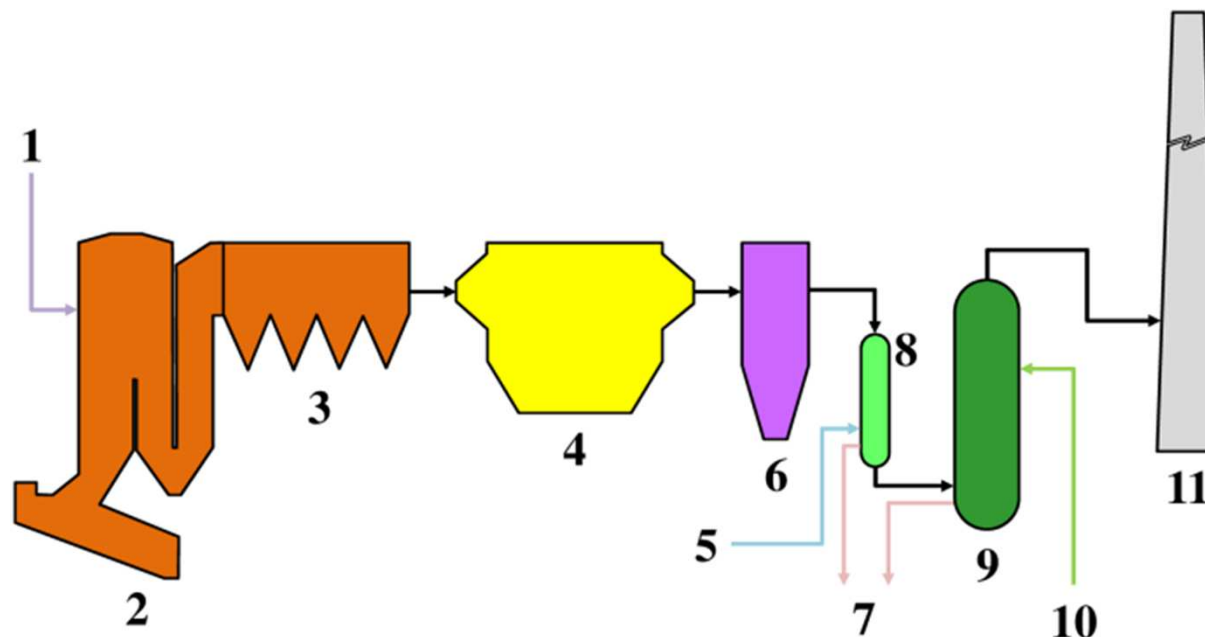


1 – kotel, 2 – rozprašovací sušárna, 3 – tkaninové filtry (do r. 2018 elektrostatický odlučovač), 4 – SCR, 5 – vstup čerstvé suspenze, 6 – předpračka, 7 – absorbér, 8 – komín, 9 – vyčerpaná suspenze, 10 – přívod ZP a vzduchu, 11 – přívod roztoku NH_4OH

Jednotky ZEVO na našem území



- Každé ze 4 zařízení ZEVO má jiný systém čištění spalin
Spalovna komunálních odpadů Liberec (Termizo a.s.)

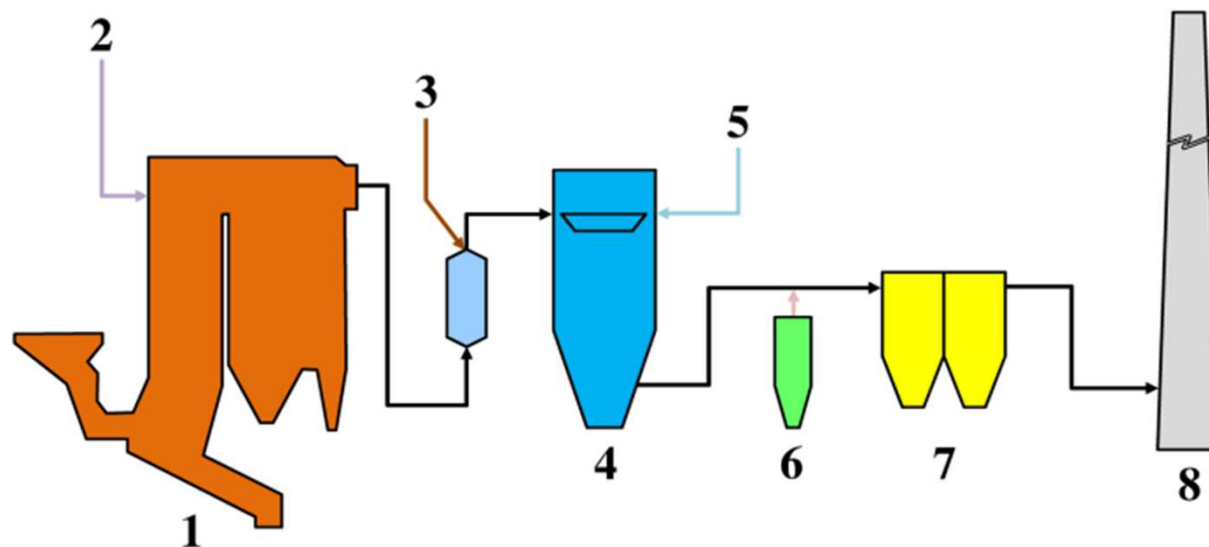


1 – přívod roztoku NH_4OH , 2 – spalovací prostor s dohořivací komorou, 3 – kotel, 4 – elektrostatický odlučovač, 5 – přívod užitkové vody, 6 – DeDiox filtr, 7 – výstup kyselých vod, 8 – quench, 9 – absorbér, 10 – přívod roztoku NaOH , 11 – komín

Jednotky ZEVO na našem území



- Každé ze 4 zařízení ZEVO má jiný systém čištění spalin
 - ZEVO Brno (SAKO Brno, a.s.)

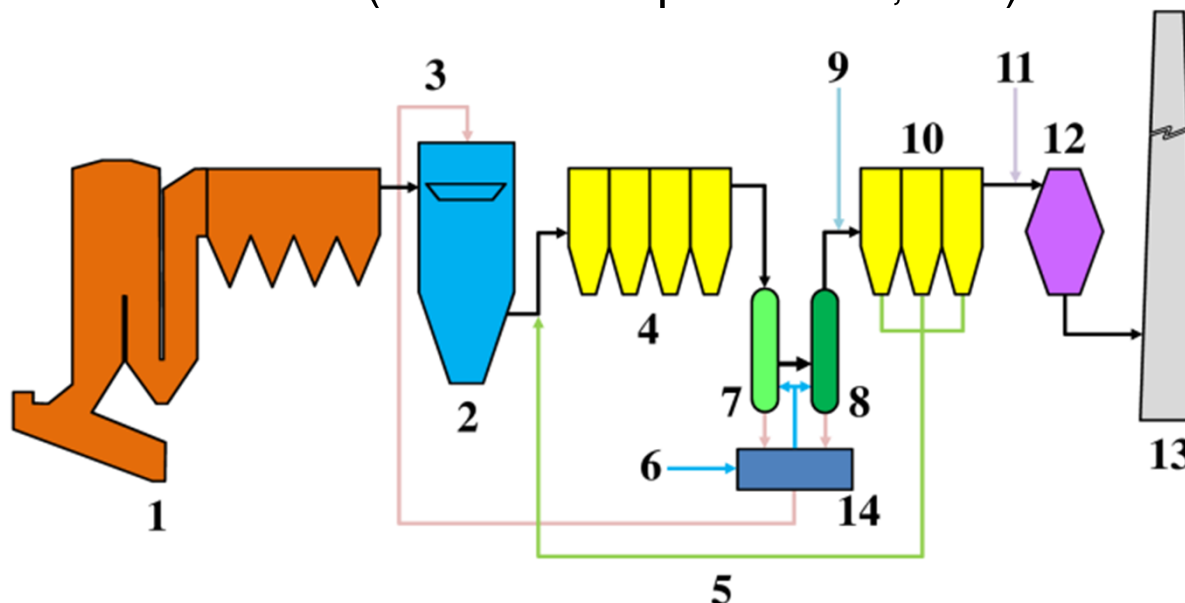


1 – kotel, 2 – přívod roztoku $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, 3 – přívod aktivního uhlí, 4 – absorbér, 5 – přívod suspenze $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 6 – nástřik práškového $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 7 – tkaninové filtry, 8 – komín

Jednotky ZEVO na našem území



- Každé ze 4 zařízení ZEVO má jiný systém čištění spalin
ZEVO Chotíkov (Plzeňská teplárenská, a.s.)



(1 – kotel, 2 – rozprašovací sušárna, 3 – recykl odpadní vody z absorbérů, 4 – první tkaninový filtr, 5 – recykl tuhého materiálu z druhého filtru, 6 – přívod procesní vody, 7 – quench, 8 – absorbér, 9 – vstup práškového Sorbalitu, 10 – druhý tkaninový filtr, 11 – přívod roztoku NH_4OH , 12 – DeNOx reaktor, 13 – komín, 14 – úprava procesních kapalin)



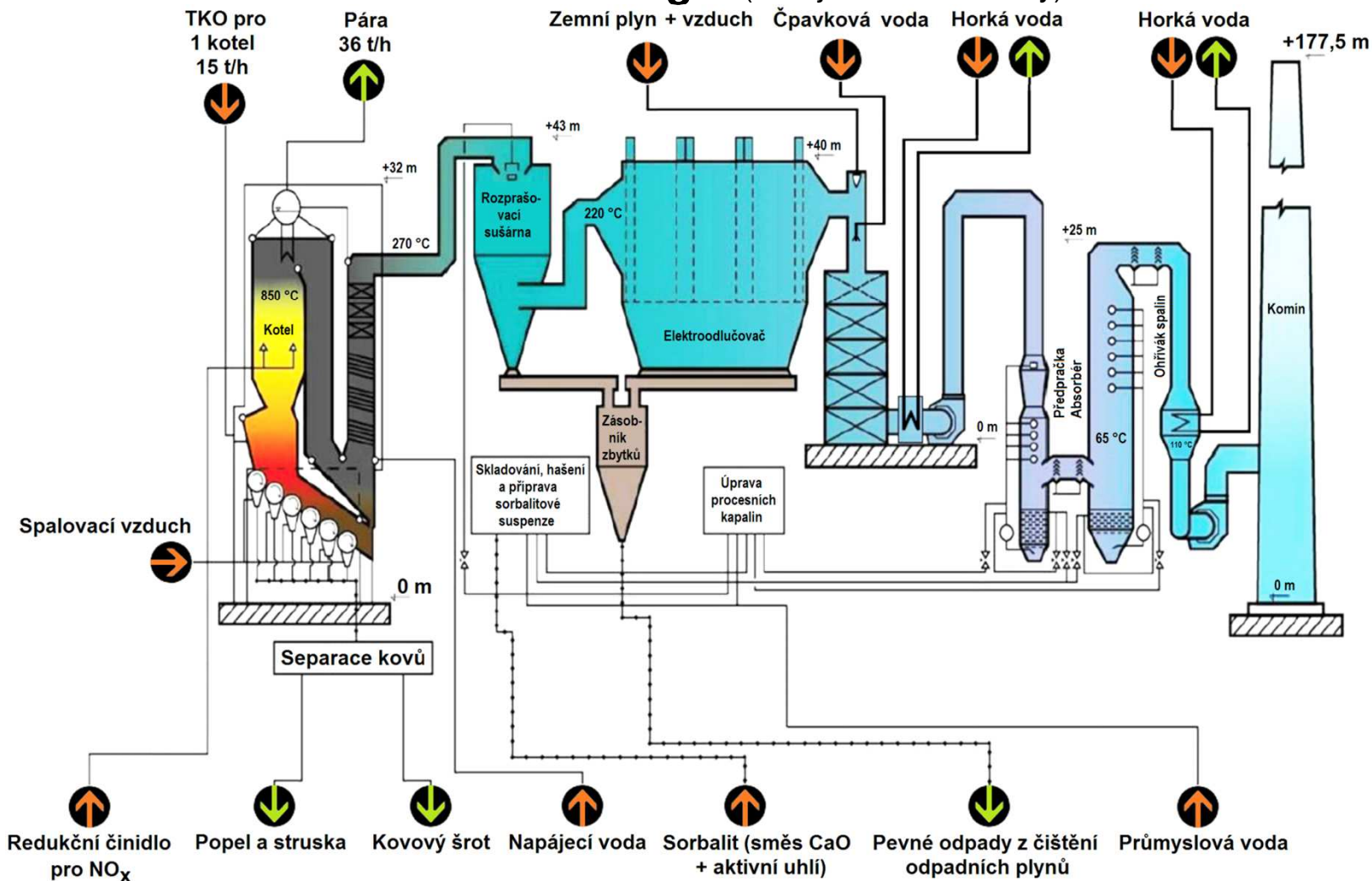
■ Základní parametry zařízení (Zdroj: Pražské služby)

- Spalovací kotle 4 ks s vratisuvnými rošty se sklonem 26°
(dříve se 6 válcovými rotačními rošty)
spalovací kapacita $15 t_{TKO}/h$ (pro kotel)
v provozu obvykle 3 kotle + 1 záložní
- Energetická produkce max. $40 t_{páry}/h$ (pro kotel)
parametry prim. páry $235^\circ C / 1,37 MPa$
menší část páry využita technologií
a v rámci dodávek odběratelům, větší
část pro kogeneraci (elektrina + teplo)
elektrina distribuována přes PRE, a.s.
do veřejné sítě (napětí 22 kV, pára
a horká voda přes Pražskou
teplárenskou, a. s.

Technol. spalovny Praha-Malešice



■ Všeobecné schéma technologie (Zdroj: Pražské služby)





- **Technologie čištění spalin** (Zdroj: Pražské služby)
 - Princip technologie čištění spalin:
 - 1) předčištění v rozprašovací sušárně
 - 2) odloučení TZL ve tkaninovém filtru (dříve elektrostatickém odlučovači)
 - 3) ohřev zemním plynem
 - 4) katalytická redukce NO_x pomocí roztoku amoniaku a zároveň destrukce PCDD/F
 - 5) mokré vypírání vápennou suspenzí obohacenou aktivním uhlím (ve dvou reaktorech: pračka + absorbér)
 - Každý kotel má samostatnou linku na čištění spalin.
 - Vypírací vápenná suspenze:

hydroxid vápenatý + 10 – 11 % aktivního uhlí (tzv. Sorbalit)

AC adsorbuje zejm. Hg a snižuje obsah zejm. PCDD a PCDF



■ Technologie čištění spalin (Zdroj: Pražské služby)

- Aby se zabránilo přechodu zbytku rtuti ve formě sublimátu HgCl_2 (vysoce toxický) do plynné fáze, udržuje se v pračce kyselé prostředí $\text{pH} = 1,1$
- Rtuť zůstává v suspenzi ve formě málo těkavého kalomelu – Hg_2Cl_2 ,
- Rtuť, ostatní těžké kovy a organické látky je prakticky všechna zachycena již v rozprašovací sušárně při prvním kontaktu s aktivním uhlím, obsaženým ve **vyčerpané suspenzi**.
- Dále pokračují spaliny přes odlučovač kapek do absorbéru.
- Spaliny procházejí absorbérem ze spodní části směrem vzhůru (protiproud).



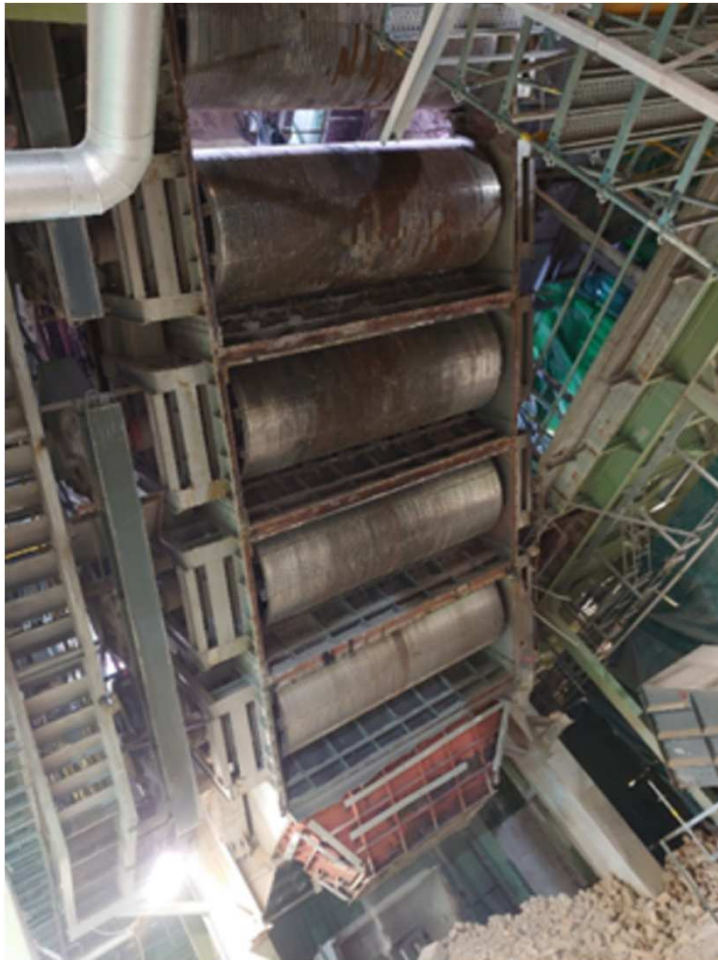
- **Technologie čištění spalin** (Zdroj: Pražské služby)
 - V absorbéru spaliny rovněž promývány vápennou suspenzí
 - Úkolem absorbéru je odloučit ze spalin SO_2 a zbytky HCl , HF , těžkých kovů a zbytku organických perzistentů. (pH se udržuje přidáváním vápenné suspenze mezi 5 – 6).
 - SO_2 (který zabraňuje v pračce přechodu rtuti z jednomocné formy na dvojmocnou) reaguje se suspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku energosádovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
 - Vyčištěné spaliny za absorbérem 60 - 65 °C
 - Pro zlepšení rozptýlu a zabránění kondenzace vody (koroze) ohřívány v horkovodním trubkovém ohřívači spalin (WAGAVO) na 110 °C a dopravovány do komína

Technol. spalovny Praha-Malešice

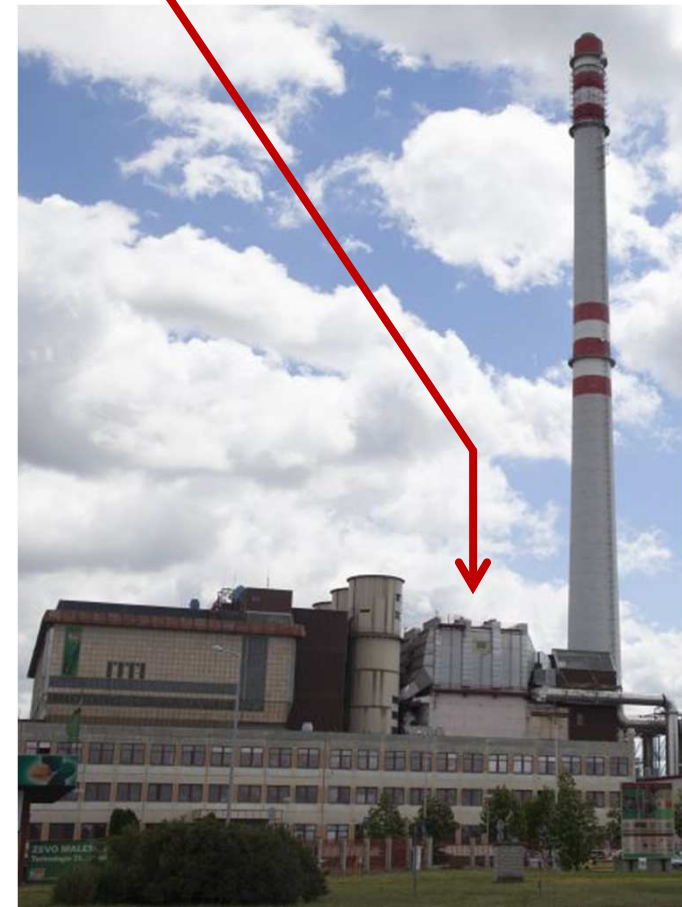


- **Rekonstrukce ZEVO Malešice 2018 – 2021** (Zdroj: Pražské služby)

náhrada ESP tkaninovými filtry



demontáž válcového roštu



Technol. spalovny Praha-Malešice



■ Instalace nového tkaninového filtru r. 2021 (Zdroj: Pražské služby)



- horizontální provedení
- čtyřsekční systém
- vstup spalin 235 °C
- celk. odlučivost 99,9%