

# TECHNOLOGIE A NÁSTROJE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ - II

## 8. TECHNOLOGIE PRO REMEDIACE A BIOREMEDIACE

### 8.3 Termické (tepelné) procesy



**Prof. RNDr. Ivan Holoubek, CSc.**

**[holoubek@recetox.muni.cz](mailto:holoubek@recetox.muni.cz); [holoubek.i@czechglobe.cz](mailto:holoubek.i@czechglobe.cz)**

**[www.recetox.muni.cz](http://www.recetox.muni.cz); [www.czechglobe.cz](http://www.czechglobe.cz)**

# Jarní SEMESTR – 2021 – TNOŽP II

Čtvrtek – 09.00 – 10.50

| Termín | Blok  | Hodin |
|--------|---|-------|
| 11/03  | 5. Vývoj prevenčních metod a přístupů k ochraně prostředí | 1     |
| 18/03  | 6. Odpadové hospodářství                                  | 8     |
| 25/03  | 6.1 Odpady – definice, přístupy, legislativní rámec       |       |
| 01/04  | 6.2 Materiálové využití odpadů                            |       |
| 08/04  | 6.3 Energetické využití odpadů                            |       |
| 15/04  | 6.4 Odstraňování odpadů                                   |       |
|        | 6.5 Nebezpečné odpady                                     |       |
|        | 6.6 Moderní trendy v odpadovém hospodářství               |       |
| 15/04  | 7. Havárie jejich řešení                                  | 2     |
| 22/04  | 8. Technologie pro remediace a bioremediace               | 10    |
| 29/04  | 8.1 Inventury kontaminovaných míst                        |       |
| 06/05  | 8.2 Remediace - přístupy                                  |       |
| 13/05  | 8.3 Fyzikální a chemické metody remediací                 |       |
| 20/05  | 8.4 Termické metody                                       |       |
|        | 8.5 Bioremediace  |       |
|        | 8.6 Případové studie                                      |       |

# ICS UNIDO Trieste

## Pure and Applied Chemistry

**Stanislav Miertus - Area Director**

**Andrea Lodolo - Scientific Advisor**

**ICS-UNIDO  
AREA Science Park, Building L2  
Padriciano, 99  
34012 Trieste, Italy**

tel +39 040 9228116/12

fax +39 040 9228115

e.mail: [andrea.lodolo@ics.trieste.it](mailto:andrea.lodolo@ics.trieste.it)

<http://www.ics.trieste.it>



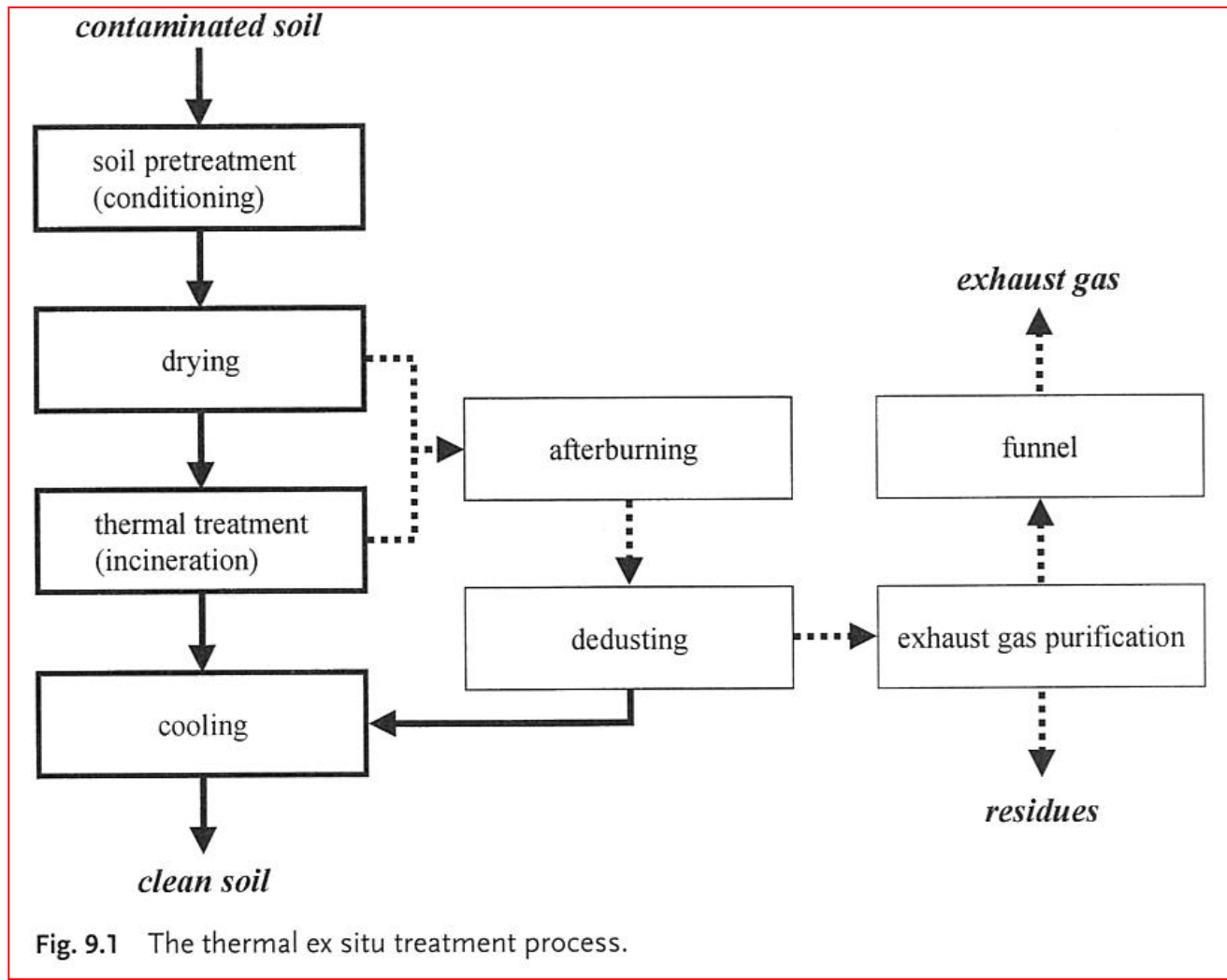
# Remediační technologie

↪ Termické

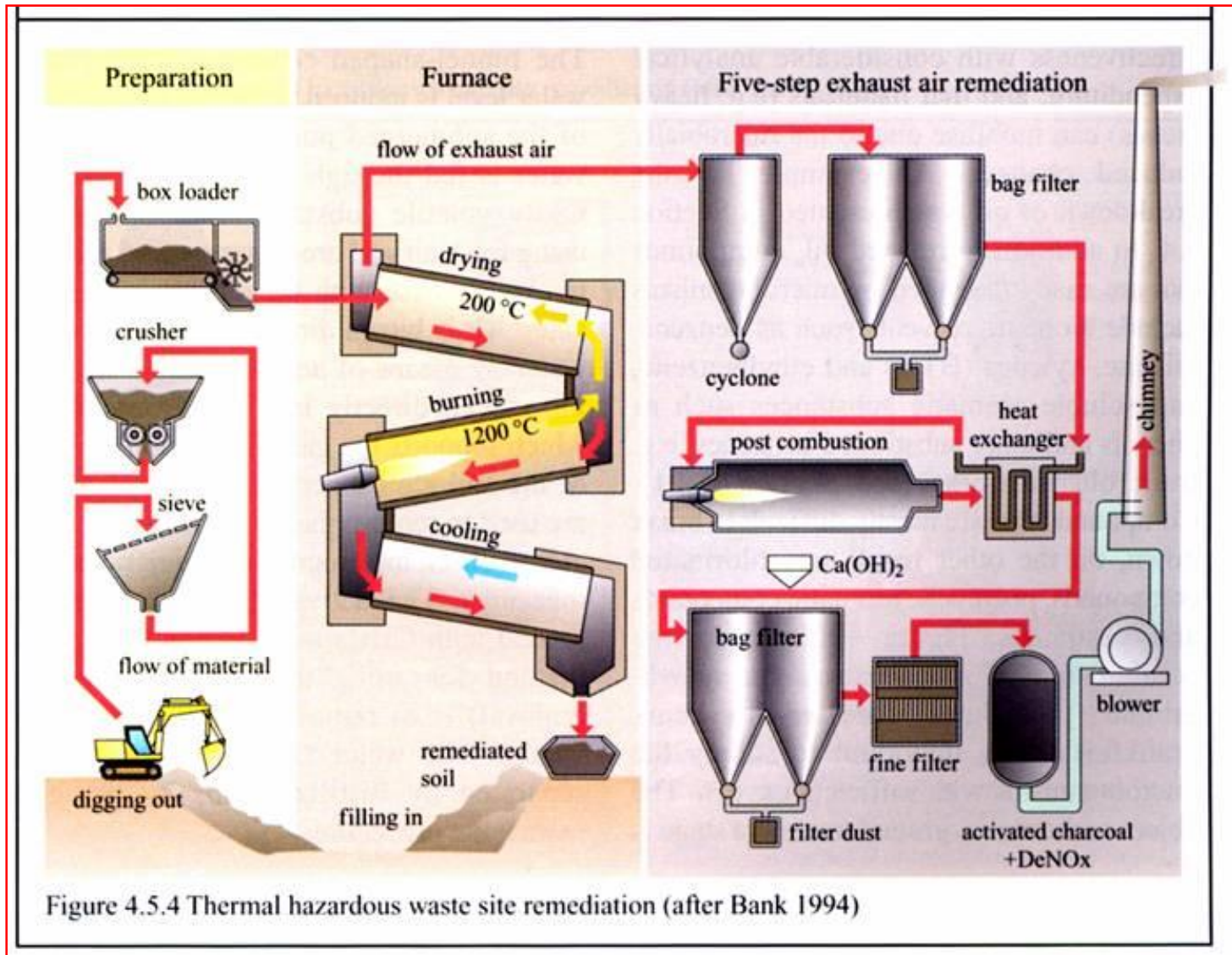
↪ Fyzikální, chemické, fyzikálně-chemické

↪ Biologické

# Termické remediace



# Termická remediace kontaminovaného území



# Tepelné sanace

## Výhody:

- ↪ Rychlé provedení
- ↪ Aplikovatelné pro organické látky
- ↪ Aplikovatelné pro tuhá media
- ↪ Významné snížení objemu

# Tepelné sanace

## Omezení:

- ↪ Není použitelné pro anorganické látky
- ↪ Není použitelné pro kapalná nebo plynná media
- ↪ Možná rezidua vyžadují další proces
- ↪ Účinnost je řízena výskytem kontaminantů
- ↪ Relativně vyšší cena



# Tepelné technologie

## Technologie

## Hlavní cílové kontaminanty

Spalovací systémy (ex)

X- (VOCs, X-SVOCs), PAHs,  
PCBs, Pest., Diox/Fur.

Termické desorpční systémy (in or ex)

VOCs, SVOCs, PAHs, PCBs, Pest.,  
Diox/Fur.

Pyrolýza (ex)

X- (VOCs, SVOCs), PAHs, PCBs,  
Pest., Diox/Fur.

Plasma Arc Systémy (ex)

PCBs, Pest., Diox/Fur.

Vitrifikace (in or ex)

X- (VOCs, SVOCs), PAHs, H.M.,  
PCBs, Pest., Diox/Fur., Anorg.

# Tepelné technologie

| Technologie                             | Cena (US\$/t) | Doba čištění*  |
|---|---------------|----------------|
| Spalovací systémy (ex)                  | 220 – 6 000   | < 6 měsíců     |
| Termické desorpční systémy (in nebo ex) | 40 - 300      | 6 to 12 měsíců |
| Pyrolýza (ex)                           | 300           | < 6 měsíců     |
| Plasma Arc Systémy (ex)                 | 750 – 1 900   | 6 to 12 měsíců |
| Vitrifikace (in nebo ex)                | 300 - 400     | < 6 měsíců     |

*(\* Doba je uváděna na standardní zpracovávané množství okolo 20 000 tons*

# Tepelné technologie

- ⇒ Spalovací systémy (ex)
- ⇒ Termické desorpční systémy (in nebo ex)
- ⇒ Pyrolýza (ex)
- ⇒ Plasma ARC systémy (ex)
- ⇒ Vitřifikace (in nebo ex)

# Termická desorpce

## Charakteristiky:

- ↪ **Není typickou oxidací nebo rozkladem kontaminantu**
- ↪ **Vytěkané kontaminanty mohou být zpracovány, znovu-použity anebo zlikvidovány**
- ↪ **Zařízení na zajištění čištění emisí jsou potřebná**
- ↪ **Existují tři typy termických desorpčních procesů**

# Termická desorpce

## Aplikace:

- ↪ Využitelné pro VOCs, SVOCs, pesticidy a PCBs
- ↪ Není využitelné pro kovy (s výjimkou rtuti), plasty, dehet
- ↪ Využitelné pro různé rozsahy kontaminantů
- ↪ Používá se v kombinaci se stabilizací nebo dechlorací
- ↪ Využitelné pro půdy v rozmezí od písků po velmi nepropustné jíly (pokud jsou tyto předtím mísen s pískem)
- ↪ Bod varu kontaminantu je klíčovým faktorem při určení aplikovatelnosti

# Termická desorpce

## Specifické výhody:

- ↪ Účinnost vyzkoušena na kontaminovaných půdách, kalech a filtračních koláčích
- ↪ Je provozována při nižších teplotách a vyžaduje méně paliva než spalování
- ↪ Schopná separovat a vytěžit koncentrované kontaminanty
- ↪ Dekontaminovaná půda má některé půdní vlastnosti, ale je sterilní

# Termická desorpce

## Specifická omezení:

- ↪ Požadavky na velikost zpracovávaného materiálu mohou ovlivňovat aplikovatelnost nebo cenu.
- ↪ Odvodnění může být nutné pro snížení vlhkosti na akceptovatelnou úroveň.
- ↪ Vysoce korozivní odpady mohou být problémem pro desorpční jednotku.
- ↪ Není aplikovatelná pro většinu anorganických kontaminantů
- ↪ Kontaminované medium musí obsahovat více než 20% tuhé fáze nebo více; obsah kolem 80% je upřednostňován
- ↪ Provedení je méně účinné, pokud jsou půdy vysoce agregované, zvláště jílová nebo osahuje více hornin
- ↪ Vysoká frakce bahna nebo jílu generuje prach

# Termická desorpce

## Ceny:

- ↪ Ceny závisí na širokém rozsahu vlastností odpadů, jejich množství, obsahu vlhkosti, vlastnostech kontaminantu a cílech čištění

## Provedení:

- ↪ **Může snižovat obsah VOCs v půdách o více než 99%**
  - **Odstranění PCBs v množství 99,99% bylo popsáno**
  - **Finální koncentrace nižší než 5 mg/kg je dosažitelná**
- ↪ **Několik faktorů ovlivňuje provedení**



# Termické technologie

- ↪ Spalovací systémy (ex)
- ↪ Termické desorpční systémy (in nebo ex)
- ↪ Pyrolýza (ex)
- ↪ Plasma ARC systémy (ex)
- ↪ Vitřifikace (in nebo ex)

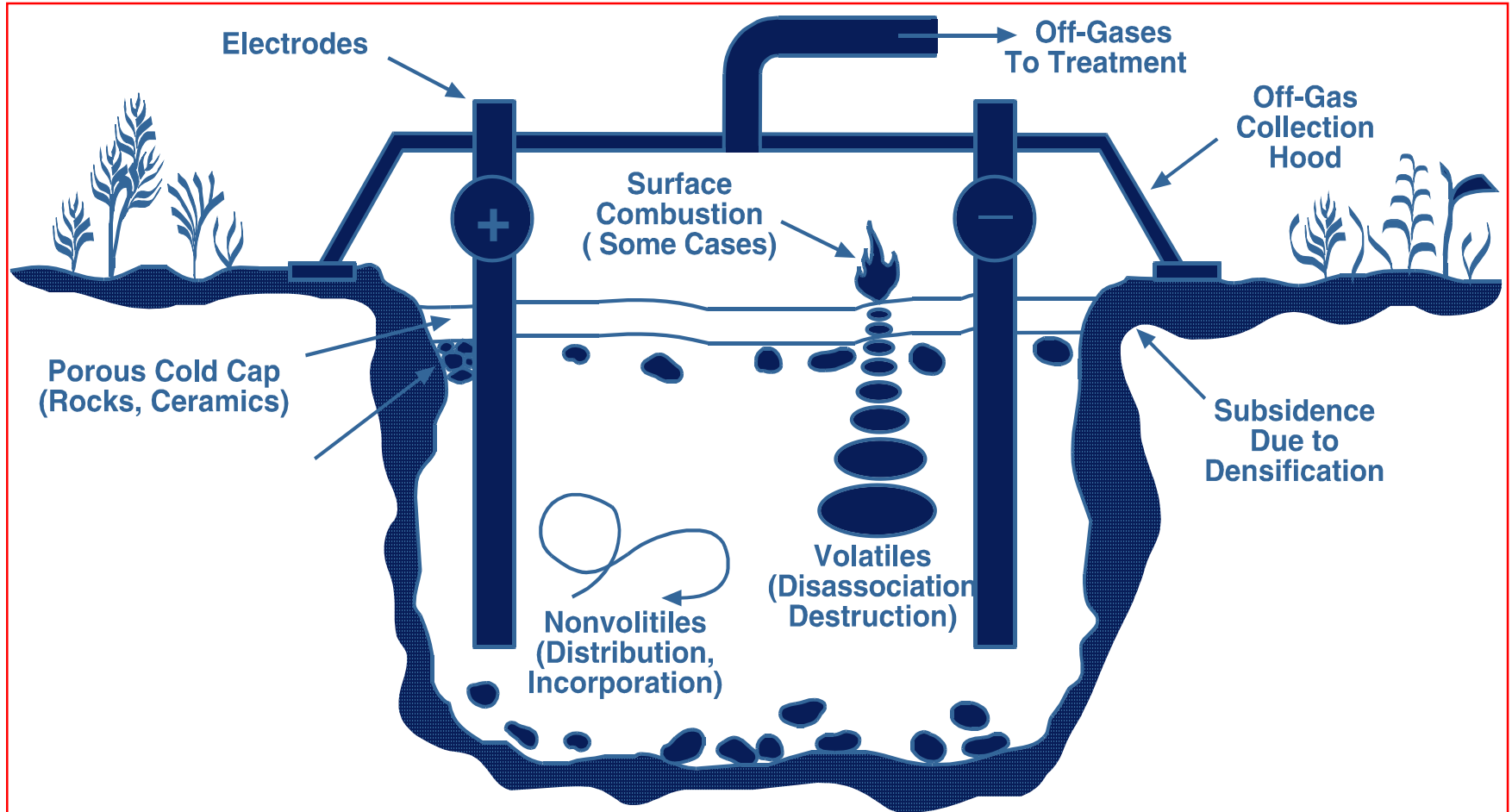
# Vitrifikační proces

## Cílové kontaminanty:

- ↪ Termické odstranění organických i anorganických látek, PCBs, pesticidů, dioxinů, azbestu a radioaktivního materialu
  - ☞ *In situ* aplikace – použití elektrického proudu pro tavení půdy nebo dalších materiálů do sklovité nebo krystalické hmoty
  - ☞ *Ex situ* - použití *pece nebo reaktoru pro tavení materiálů*

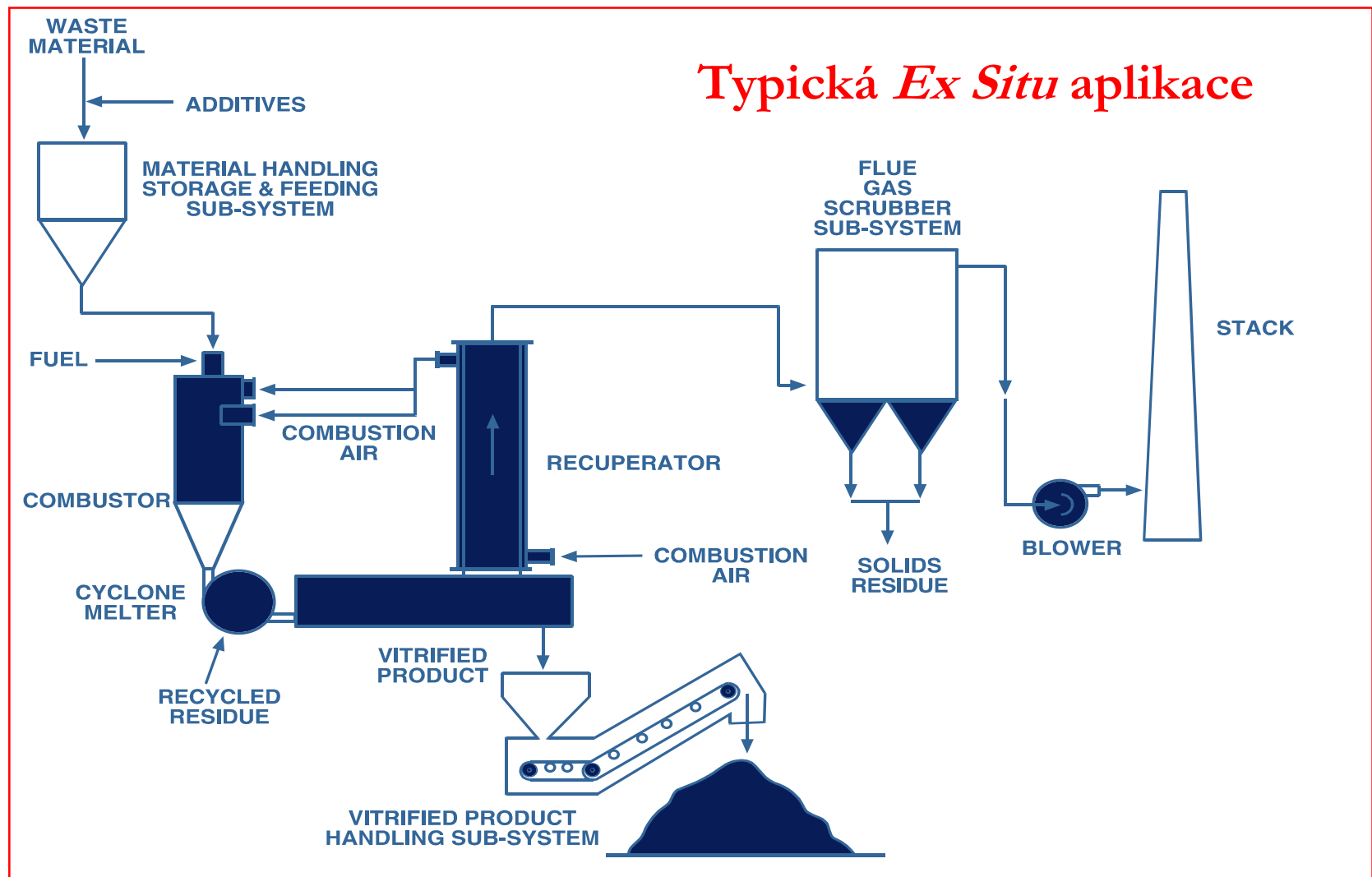
# Vitrifikační proces

## Typická *In Situ* aplikace

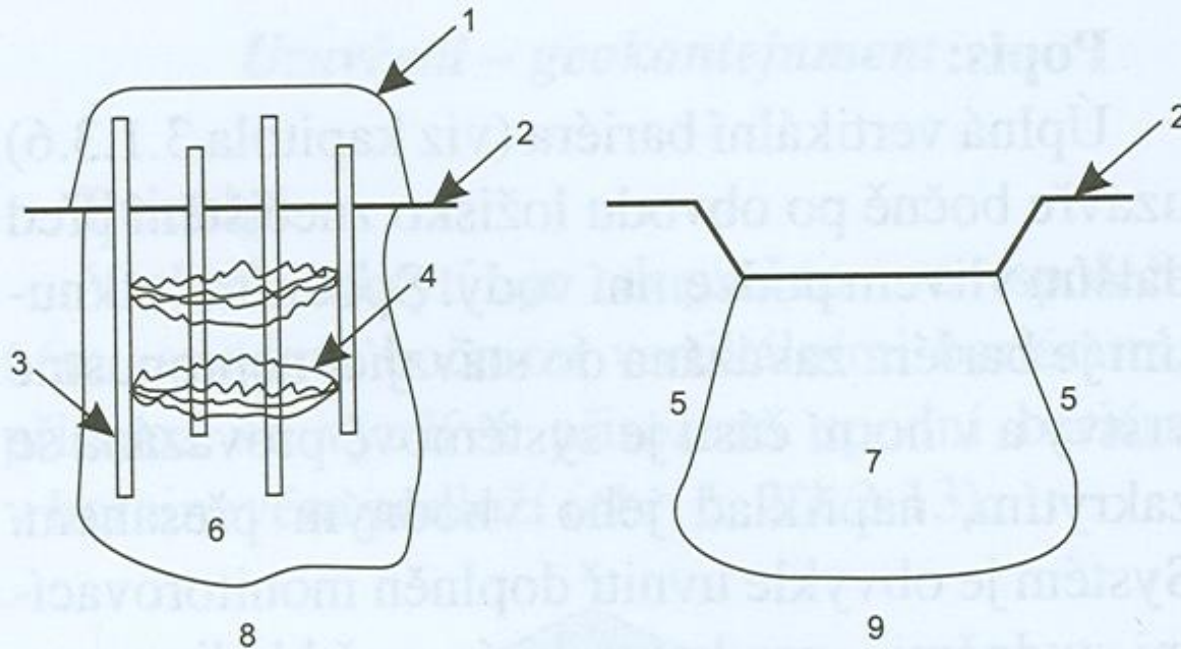


# Vitrifikační proces

## Typická *Ex Situ* aplikace



# Vitrifikační proces



*Obr. č. 2.1.2-15 Schéma technologického uspořádání vitrifikace (Dzombak, 2003)*

*1 – kryt, 2 – úroveň terénu, 3 – elektrody, 4 – elektrický proud, 5 – zemina, 6 – roztavená zemina, 7 – blok materiálu podobného sklu, 8 – během vitrifikace, 9 – po vitrifikaci*

# Vitrifikační proces

## Základní složky:

### *In Situ* aplikace:

- ↪ Zdroj energie
- ↪ Elektrody
- ↪ Plynový sběrný systém
- ↪ Systém pro zpracování plynu

# Vitrifikační proces

## Základní složky:

### *Ex Situ* aplikace:

- ↪ Přípravné a míchací zařízení
- ↪ Pec nebo reaktor
- ↪ Systém monitoringu produktů
- ↪ Systém zpracování vznikajících plynů

# Vitrifikační proces

## In situ a ex situ aplikace:

- ↪ **Kontaminovaná media – půdy, kaly, směsné odpady**
- ↪ **Kontaminanty – organické, anorganické**
- ↪ **Koncentrace kontaminantů nejsou limitujícím faktorem**



# Vitrifikační proces

## Výhody:

- ↪ Využitelné pro široký rozsah odpadů
- ↪ Velmi účinné pro destrukci a imobilizaci
- ↪ Vznik komerčně využitelných vedlejších produktů (*ex situ*)

# Vitrifikační proces

## Omezení:

- ↪ Fyzikální charakteristiky odpadů nebo lokalit
- ↪ Vyšší zpracovatelská cena
- ↪ Budoucí využití takto čištěného místa musí být spojeno s *in situ* procesem

# Vitrifikační proces

## Cenové údaje:

- ↪ Studie proveditelnosti zpracování jsou nezbytné
- ↪ Design provedení je variabilní a závisí na místě a typu odpadů
- ↪ Jednotková cena provedení se pohybuje v rozmezí \$ 260 - \$ 660 za m<sup>3</sup>
- ↪ Místní uspořádání technologie (*in situ*) může zvyšovat cenu

# Vitrifikační technologie - GeoMelt

The **GeoMelt technology**[\[1\]](#) by AMEC belongs to the family of vitrification remediation technologies, which can treat a range of contaminants in soil, from radioactive to POPs.

GeoMelt can be applied in a variety of in situ modes and above ground, ex situ modes.

In the latter case, which is of interest for stockpiled POP treatment, it appears suitable for the destruction of matrices with high content of POPs, namely soil mixed with POPs such as land filled pesticides and bulk POPs (e.g. PCBs and liquids) if premixed with soil.

[\[1\]](#) US Patent 4,376,598; US Patent 6,120,430; European Patent 98926394.2-2309.

# Vitrifikační technologie - GeoMelt

The GeoMelt technologies use electric current to convert contaminated soil and wastes into a stable glass and crystalline product.

Graphite electrodes are inserted into the contaminated material and a flow of electric current is applied.

As the molten zone grows it incorporates hazardous inorganic elements while the high processing temperatures destroy organic components thermally.

When electrical power is shut off, the molten mass cools and ultimately solidifies into a vitreous and crystalline, rock-like monolith.

Organic contaminants are destroyed and undestroyed contaminants, e.g. residual organic and inorganic, are immobilized within the resulting vitreous product.

# Vitrifikační technologie - GeoMelt

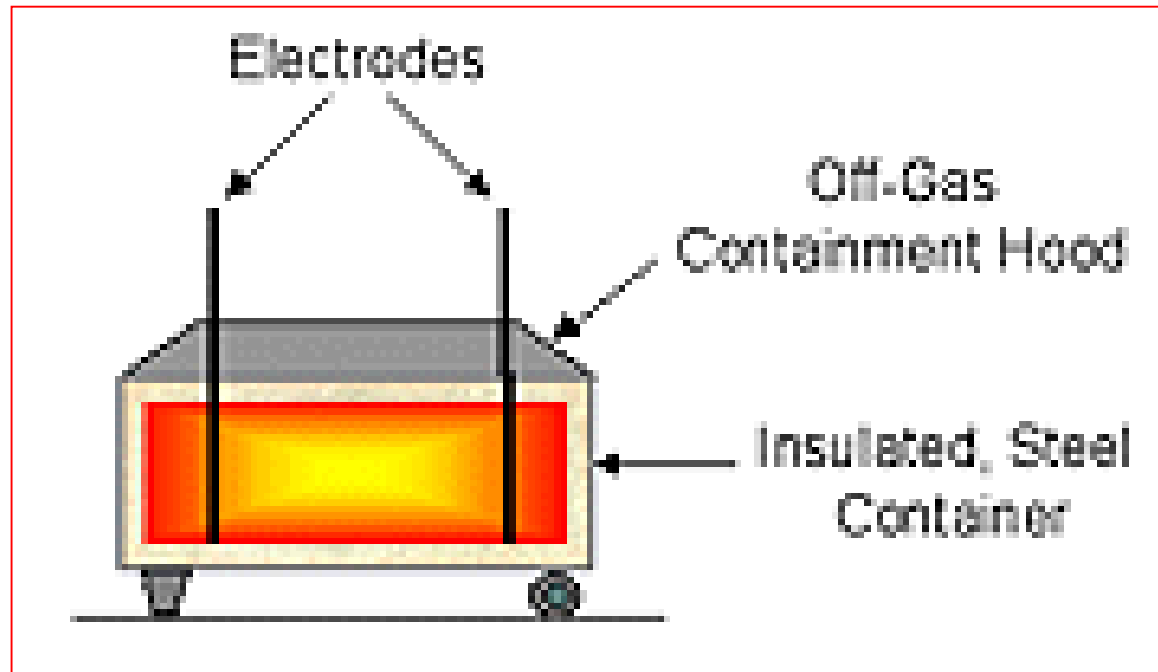
The chemistry of the process is that of **pyrolysis**, i.e. the organic content is thermally decomposed in the presence of limited amount of oxygen.

A number of reactions can take place, giving, as result, a wide range of products, namely mono- and dioxide of carbon, elementary carbon, methane, water, hydrogen, etc.

All types of organics are equally destroyed at such high temperatures, including polychlorinated POPs.

In this case, chlorine would mostly transform into hydrochloric acid.

# Vitrifikační technologie - GeoMelt



## GeoMelt In-Container Vitrification

# Vitrifikační technologie - GeoMelt

## Advantages

- ↙ Mobility (all equipment easily transported to site by truck)
- ↙ Low cost technology
- ↙ Simple in operation, no other reagents/materials are required than soil
- ↙ Vitrified product from ICV process is easily transported by truck and the container itself can be re-used or disposed of after treatment
- ↙ Efficiency does not depend much on the waste type
- ↙ Able to simultaneously process mixtures of organic, inorganic and radioactive contaminants
- ↙ The process can accommodate large items of debris, which minimizes the need for size reduction and other handling steps



# Vitrifikační technologie - GeoMelt

## Limitations, disadvantages, and concerns

- ↪ Need to dispose of the vitrified product
- ↪ Only limited to soils (no bulk chemicals can be processed without their mixing with soil)
- ↪ Not applicable to humid soil, dewatering increases costs
- ↪ Does not seem safe and effective for destruction of volatile waste
- ↪ High electricity requirements
- ↪ Formation of dioxins/furans seems to be obvious under the operating conditions
- ↪ Vigorous off-gas treatment is required
- ↪ Use or disposal of the resultant vitrified slag is required
- ↪ No sufficient data to prove feasibility and economic reasonability as concerns application to POPs, especially at their high concentrations
- ↪ Low destruction efficiency

# Hlavní omezení zavedených termických technologií

|                                    | <b>Spalovací systémy</b>   | <b>Termická desorpce</b>   | <b>Pyrolýza</b>  |
|------------------------------------|--|--|--|
| <b>Technická/ekonomická rizika</b> | Je nutné čištění těžkých kovů.<br>Je nutné důsledně dodržovat předpisy, aby nevznikaly dioxiny.<br>Starší typy cementových pecí nejsou vhodné. | Je nutné odvodnit, abychom dosáhli požadovanou vlhkost zeminy.<br>Je nutné následné čištění.                   | Nepůsobí na anorganické složky.<br>Funkčnost závisí na vlhkosti půdy, což má dále vliv na celkové náklady. |
| <b>Sociální rizika</b>             | V řadě případů mohou tyto metody vyvolat odpor veřejnosti.   | Pokud má vazbu na spalovací systémy, může vyvolat odpor veřejnosti.  | Zpravidla nevyvolává odpor veřejnosti.   |
| <b>Ekologická rizika</b>           | Emise produktů spalování.<br>Může dojít k uvolnění toxických sloučenin (dioxiny, furany, chlorované sloučeniny)                                | Možnost vzniku těkavých emisí.<br>Emise spalin a možnost vzniku dioxinů (pokud je vazba na spalovací systémy). | Vyžaduje kontrolu a systémy, aby nedocházelo ke vzniku dioxinů.<br>Vyžaduje regulace spalin.               |

# Hlavní omezení zavedených termických technologií

|                       | Combustion Systems  | Thermal Desorption  | Pyrolysis   |
|-----------------------|---|---|---|
| Technical<br>Economic | <p>Require cleaning systems for heavy metals.</p> <p>Need strict control to prevent dioxins formation.</p> <p>Older types of cement kilns are not suitable.</p> | <p>Require dewatering to achieve proper soil moisture levels.</p> <p>It must be linked to a post treatment.</p>                                     | <p>Does not attack inorganic compounds.</p> <p>Performance depends on the soil moisture content, which has correlation with overall cost.</p> |
| Social                | <p>In many cases may attract public opposition.</p>   | <p>If it is linked to combustion systems may present public opposition.</p>   | <p>Usually does not attract public opposition.</p>  |
| Environmental         | <p>Emission of combustion products.</p> <p>Potential release of toxic compounds (dioxins, furans, chlorinated compounds).</p>                                   | <p>Potential of fugitive emissions.</p> <p>Emission of combustion gases and potential formation of dioxins (when linked to combustion systems).</p> | <p>Require controls and systems to prevent dioxins formation.</p> <p>Needs control of combustion gases.</p>                                   |

# Hlavní omezení zavedených termických technologií

|                             | <b>Technologie s integrovanou termickou desorpcí</b>  | <b>Systémy s plazmovým obloukem</b>   | <b>Vitrifikace</b>   |
|-----------------------------|---|---|--|
| Technická/ekonomická rizika | Celková účinnost metod je omezena účinností termické desorpce, která závisí na typu a parametrech zeminy.   | Odstraňování těkavých kovů a pevných částic vzniklých z anorganických sloučenin může vyžadovat čištění – tento další krok může zvýšit náklady. Tento proces vyžaduje relativně vysoké vstupní a provozní náklady. Některé systémy jsou omezeny na čištění kapalin a plynů. Pevné látky lze čistit pouze po extrakci nebo po vytvoření suspenzí. | Vitrifikace představuje destrukční proces – půdu již nelze použít v zemědělství. Nitrifikovaná matice může bránit budoucímu využití lokality.  |
| Sociální rizika             | V některých případech mohou tyto metody vyvolat odpor veřejnosti.   | Veřejnost zpravidla nepřijímá nepříznivě.   | Bez známého odporu veřejnosti.   |
| Ekologická rizika           | Spalování koncových plynů vyžaduje regulační zařízení a čištění emisí. Je nutné stanovit a regulovat podmínky procesu tak, aby se minimalizovalo riziko vzniku dioxinů a furanů. Dále je zapotřebí čisticí zařízení pro případ, že by se tyto látky v malém množství tvořily. | Díky absenci spalin jsou plynné emise menší než u spalovacích systémů. K dispozici musí být vyrovnávací nádrž pro nekontrolovaný únik plynů z čisticí komory. Případné těkavé emise by měla eliminovat mechanická těsnění a provoz systému při mírném podtlaku.   | Je třeba dávat pozor, aby se zabránilo těkavým emisím odpařených organických látek. Vitrifikovaný charakter matice výrazně snižuje potenciální výluh kovů a jiných zbytkových polutantů. |

# Hlavní omezení zavedených termických technologií

|                          | Thermal desorption integrated technologies  | Plasma Arc Systems   | Vitrification  |
|--------------------------|---|--|--|
| Technical/<br>Economical | Overall efficiencies of methods are limited by thermal desorption efficiency, that depends on soil type and conditions.   | The removal of volatile metals and particulates formed from inorganic components may require treatment; these additional steps may increase the cost. This process usually has a relatively high capital and operating cost. Some systems are limited to treat liquids and gases. Solids can only be treated after extraction or by forming slurry mixtures. | Vitrification is a destructive process and the soil can no longer be used for agricultural purposes. The vitrified matrix may hinder future use of the site if done <i>in-situ</i> .                 |
| Social                   | In some cases may attract public opposition.  | Generally not regarded adversely by community.   | No known public opposition.  |
| Environmental            | Combustion of off-gases requires control and emissions treatment. Process conditions must be selected and controlled in order to minimize the risk of dioxin and furan formation, and require pollution control equipment to treat these in the event that small quantities are formed. | The absence of combustion gases results on a gas emission smaller than for incineration systems. A surge tank is provided to contain any uncontrolled release of gases from the treatment chamber. The use of mechanical seals and operation of the unit at slight negative pressures should prevent any fugitive emissions.                                 | Cautions must be taken to prevent fugitive emissions of vaporized organics. The vitrified nature of the formed matrix greatly reduces any potential leaching of metals or other residual pollutants. |