



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimento del territorio

CSDINGEGNERI⁺
INGEGNOSI PER NATURA

Analisi delle metodologie di risanamento dei terreni contaminati da PFAS

09.10.2023

ICH010113.01

SPAAS - Sezione della protezione dell'aria, dell'acqua e del suolo
Divisione dell'ambiente, **Repubblica e Cantone Ticino**

CSDINGEGNERI⁺
INGEGNOSI PER NATURA

Eugenio Ciabattoni, Simona Piubellini, Siria Silini

INDICE

- 1 Revisione concetti fondamentali
- 2 Tecnologie di risanamento e matrice di valutazione multicriterio

INTRODUZIONE E SCOPO

PFAS:

Per- and PolyFluoroAlkyl Substances (Sostanze Per- e PoliFluoroAlchiliche)

Scopi del lavoro:

- + Fornire una panoramica sui PFAS, sulla loro chimica, tossicità, proprietà e comportamento ambientale, in particolare sulle loro relazioni con il suolo.
- + Fornire una visione dettagliata e aggiornata dello stato dell'arte delle metodologie di bonifica di terreni contaminati da PFAS e di possibili sviluppi futuri, soprattutto per quel che riguarda tecnologie in situ e on-site.
- + Costruire una matrice contenente metodologie e criteri di valutazione, oltre a commenti e suggerimenti tecnici, tale da essere un utile supporto decisionale alle future procedure di bonifica in progetto.

CLASSIFICAZIONE

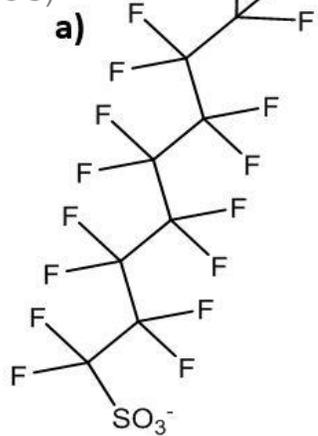
PFAS: sostanze per- e polifluoroalchiliche

+ Molte definizioni

+ OECD 2021:

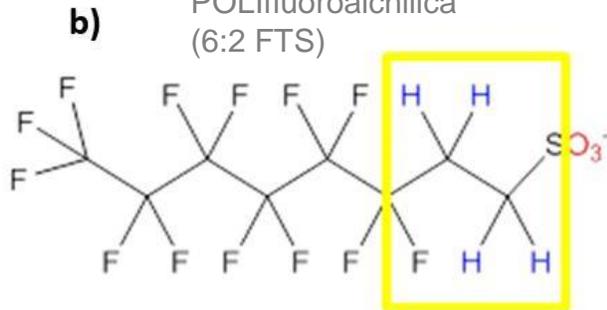
«classe di composti organofluorurati che contengono almeno un gruppo metilico perfluorurato (-CF₃) o metilenico perfluorurato (-CF₂-), senza cioè alcun atomo di H/Cl/Br/I legato all'atomo di carbonio»

Sostanza
PERfluoroalchilica
(PFOS)

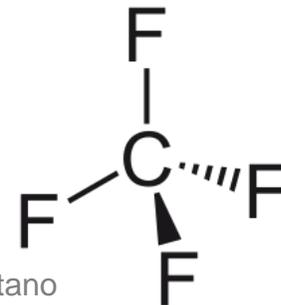


PFOS vs 6:2 FTS

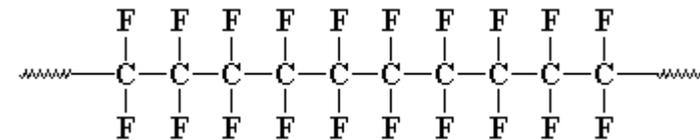
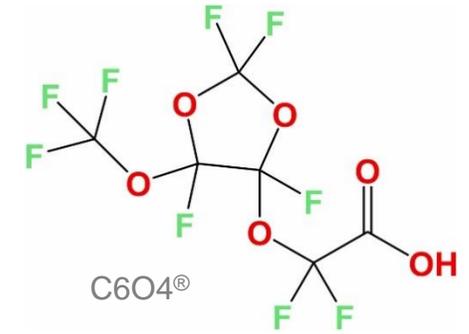
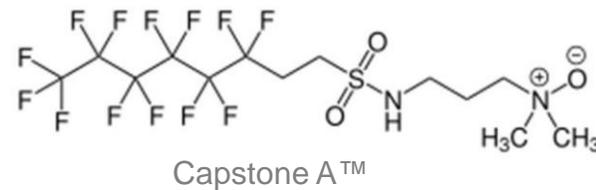
Sostanza
POLifluoroalchilica
(6:2 FTS)



Tetrafluorometano



Diversi tipi di PFAS:



Teflon™

CLASSIFICAZIONE

Vastissima famiglia: oltre 4700 sostanze

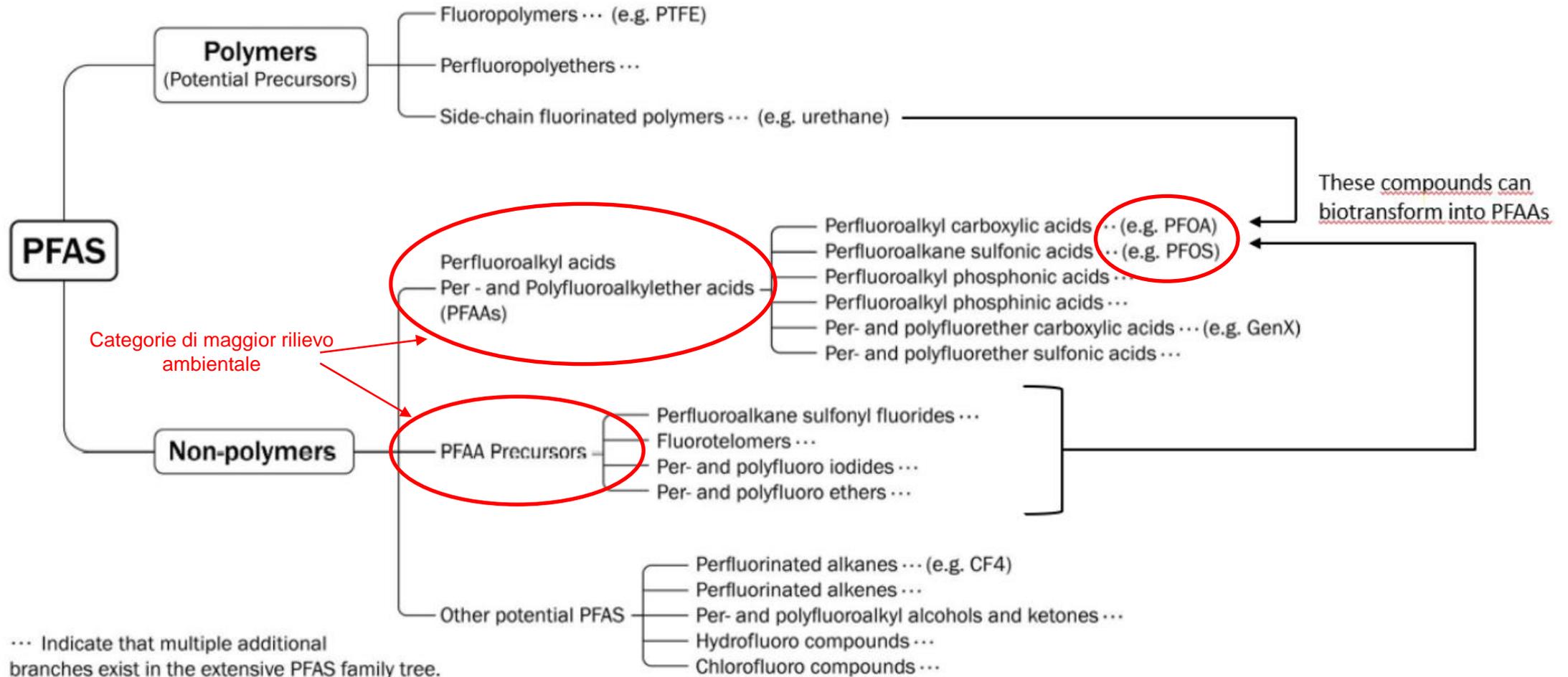


Figure 1. PFAS family and subgroups, based on: Winchell et al., 2021, with biotransformation paths from precursors to PFAAs.

CLASSIFICAZIONE

Gli acidi perfluoroalchilici (PFAA): catena lunga e catena corta

A sinistra: acidi perfluorocarbossilici (PFCA). A destra, acidi perfluorosolfonici (PFSA)

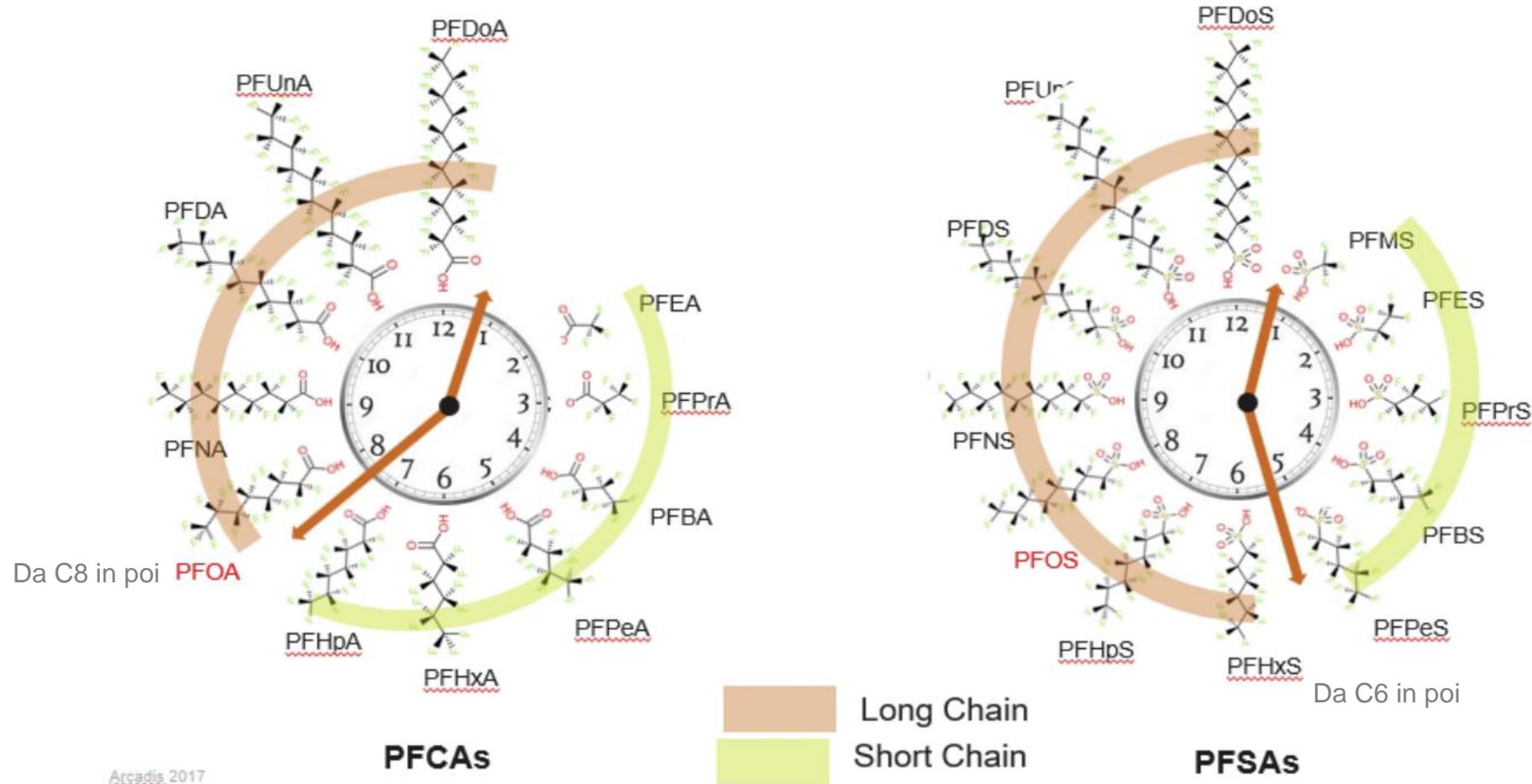
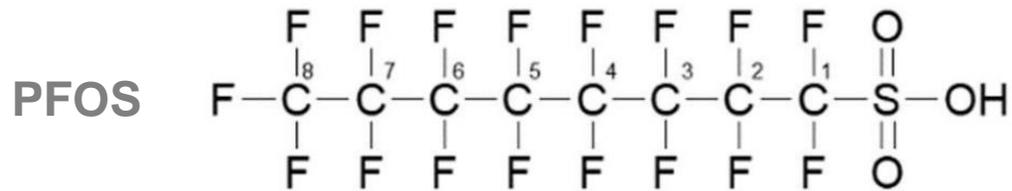
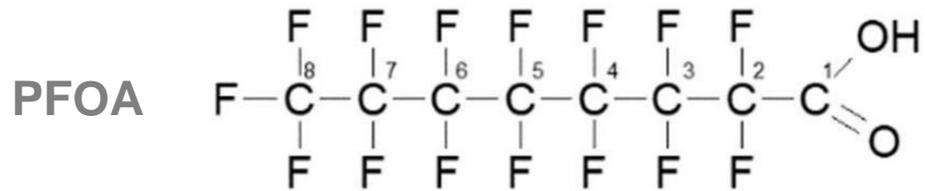


Figure 4. Distinction in short and long chain PFAS for PFCAs and PFSA (Arcadis, 2017).

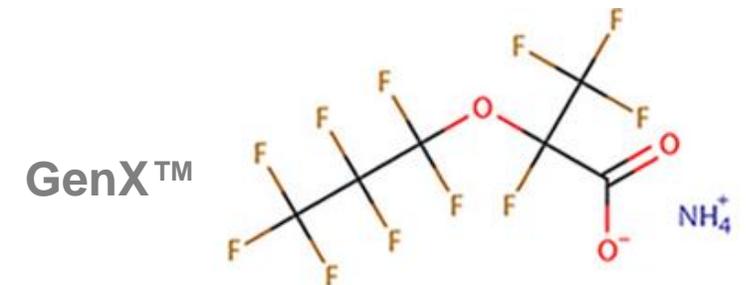
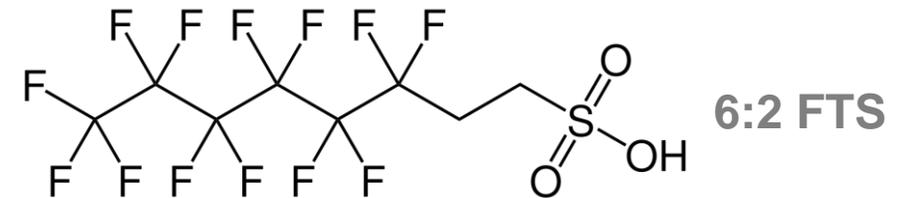
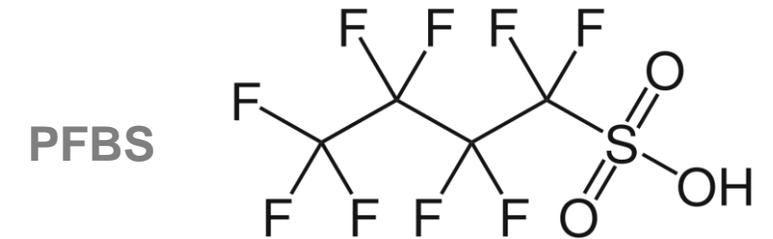
CLASSIFICAZIONE

PFOA e PFOS

PFOA, PFOS...



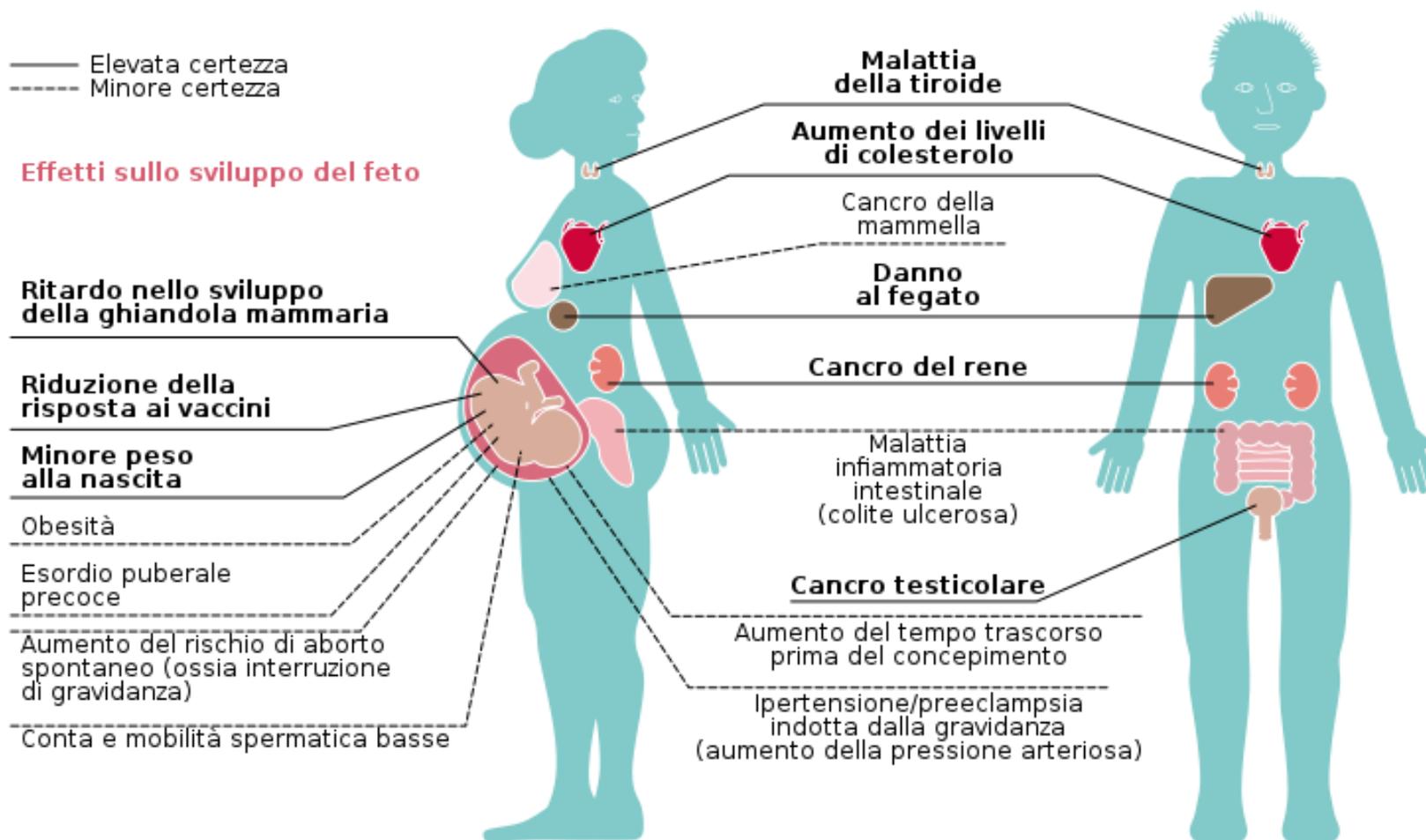
...e loro nuovi sostituti



...e molti altri
(spesso brevettati)

TOSSICOLOGIA

Tossicità e bioaccumulabilità di molti PFAS



UTILIZZI

Inerzia chimica e termica, idrofobicità, oleorepellenza, basso attrito, isolante elettrico...



- **Schiume antincendio AFFF** e AR-AFFF per liquidi altamente infiammabili
- **Trattamenti galvanici** (metalli e plastica)
- Industria della carta (carte rifinite in superficie, **carte e cartoni** per il contatto con gli alimenti umidi e grassi, ad es. **fast-food** e cartoni pizza)
- Industria tessile: membrane traspiranti impermeabili (**Gore-Tex™**), abbigliamento funzionale, calzature, tappeti **antimacchia**, carte da parati, mobili in pelle)
- Produzione di **pitture e vernici** (pitture murali speciali, inchiostri, inchiostri da stampa)
- Industria chimica
 - **Produzione di fluoropolimeri**, ad es. PTFE (**Teflon™**)
 - Produzione di **pesticidi**
 - Produzione **tensioattivi** nella produzione di petrolio
 - Produzione additivi per batterie al litio
 - Produzione di ritardanti di fiamma per cere combinate con paraffina
 - Produzione di **agenti di finitura superficiale**/impregnanti per mobili, tessuti, pelle, tappeti
 - Produzione di fluidi idraulici ad alte prestazioni (ad esempio per l'aviazione)
 - Produzione di sigillanti e **lubrificanti** ad alte prestazioni con fluoropolimeri, PTFE e PFPE
- Produzione di cera (**scioline** da sci di alta qualità)
- Detergenti e **cosmetici**
- Industria dei semiconduttori (schede elettroniche)
- Industria fotografica (pellicole, carte e lastre fotografiche)
- ...

UTILIZZI e LUOGHI DI CONTAMINAZIONE

Maggiori aree a potenziale rischio contaminazione in Svizzera

- + **Schiume antincendio tipo AFFF:**
 - Aree di addestramento antincendio;
 - Aeroporti civili e militari.
- + **Industria galvanica** (rivestimento/placcatura di metalli e plastiche).
- + **Industria della carta** (trattamento carte) e fanghi.
- + **Industrie di produzione di fluoropolimeri e PFAS in generale.**
- + **Discariche.**

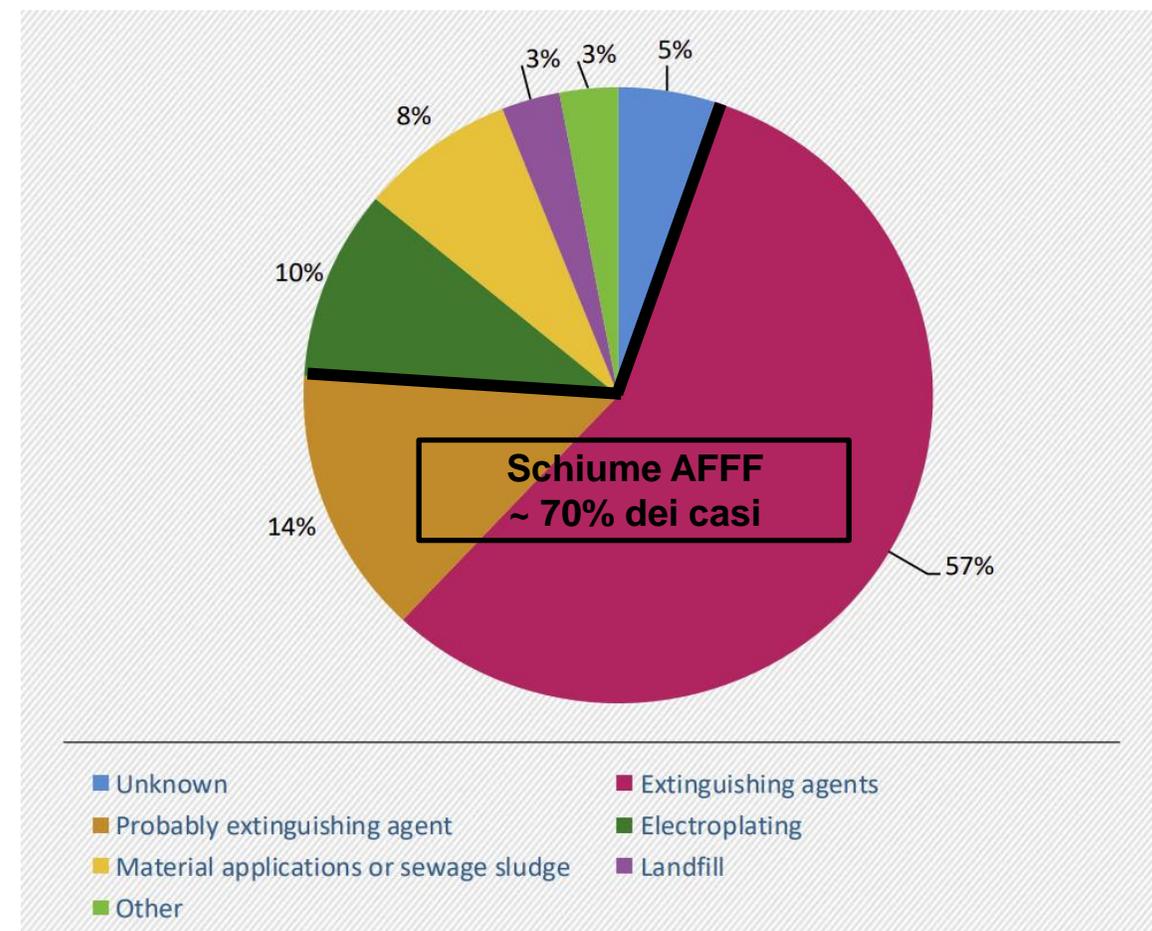
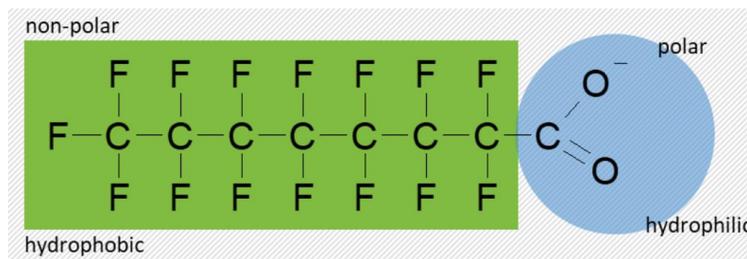


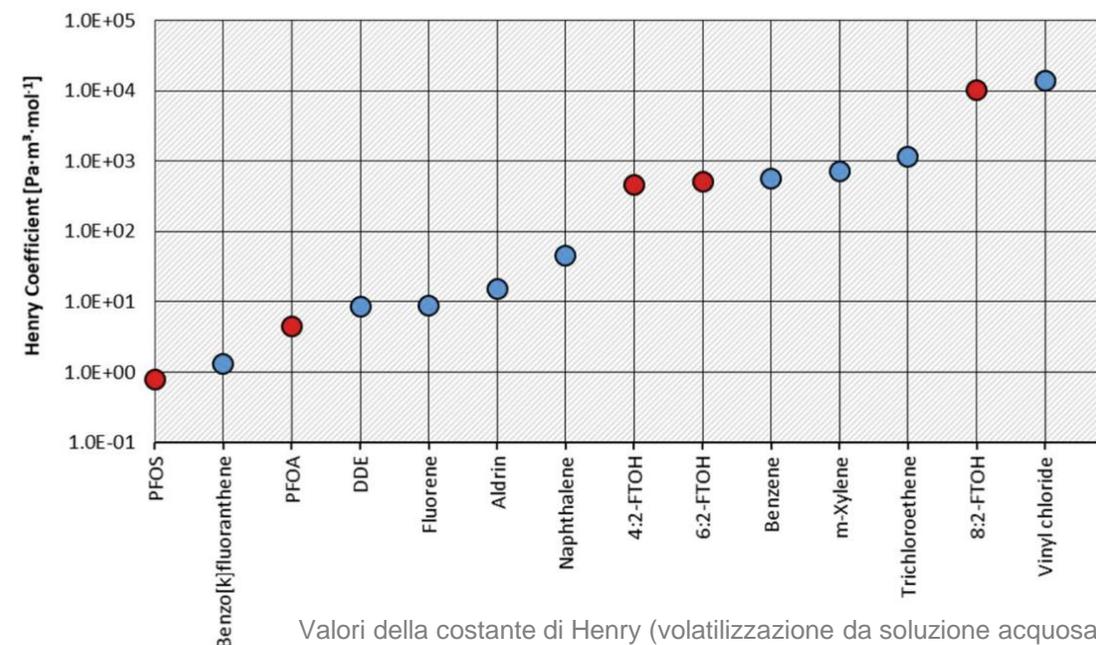
Figura 7: Casi di PFAS in Nordreno-Vestfalia (stato: 04/2017) in base alle cause [78]

PROPRIETA' FISICO-CHIMICHE

- + **Stato fisico:** quasi sempre solido, alcuni liquidi (es. FTOH a catena corta).
- + **Solubilità in acqua:** buona.
- + **Dissociazione in acqua:** sempre in forma dissociata nei range di pH ambientali (tranne gli FTOH)
- + **Volatilità:** basso-media; alta per i FTOH.
- + **Proprietà tensioattive:**
 - si accumulano naturalmente alle interfacce aria-acqua, con l'aria che agisce come fase idrofobica;
 - più «forti» degli analoghi tensioattivi idrocarburici;
 - hanno comportamento sia idrofobico che lipofobico
 - i PFAS a catena corta hanno un comportamento tensioattivo inferiore a quelli a catena lunga.



	Temp. di fusione (°C)	Temp. di ebollizione (°C)
PFOA	60	192
PFOS	200	300



Valori della costante di Henry (volatilizzazione da soluzione acquosa) per alcuni PFAS a confronto con altre sostanze

PROPRIETA' FISICO-CHIMICHE

Distribuzione dei PFAS nei diversi compartimenti ambientali - Parametri di interesse

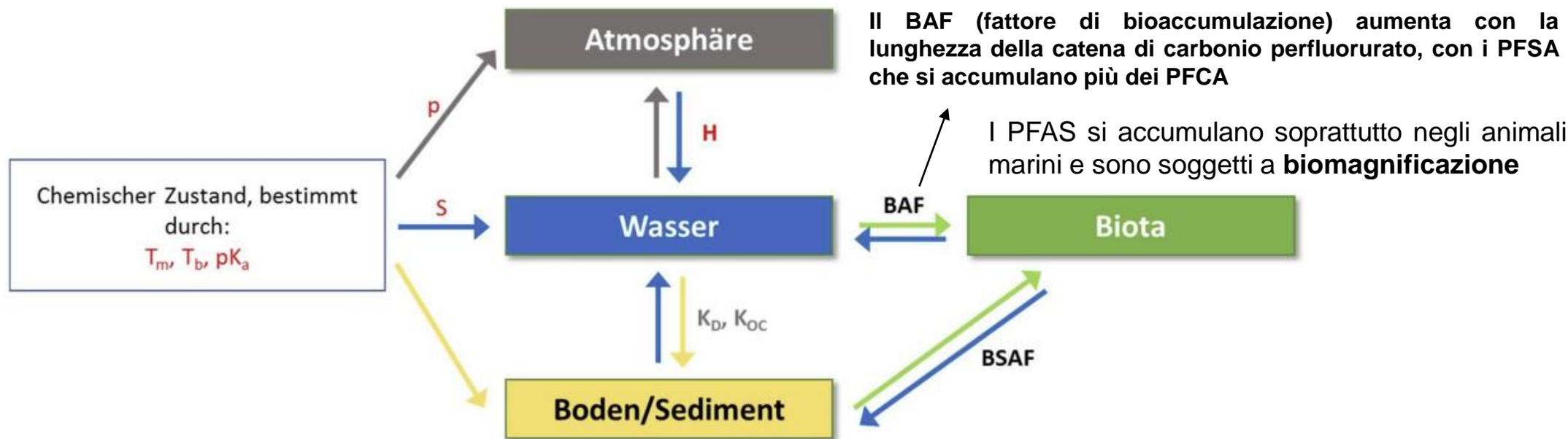


Fig. 6: PFAS substance distribution in different environmental compartments and the role of the most important physical and chemical properties (red). Other significant distribution coefficients (in gray) are e.g. K_D , K_{OC} values. T_m = melting point, T_b = boiling point, pK_a = acid dissociation constant, p = vapor pressure, S = solubility, H = dimensionless Henry constant, BAF = bioaccumulation factor and $BSAF$ = biota sediment accumulation factor., K_D = solid-water partition coefficient, K_{OC} = organic carbon-water partition coefficient.

COMPORAMENTO AMBIENTALE

Adsorbimento

+ Diversi e complessi meccanismi di adsorbimento possibili, sia su fase organica che minerale

+ Per concentrazioni < 1mg/L, l'isoterma di adsorbimento è lineare:

$$K_D = \frac{C_F}{C_W} \quad K_D = K_{oc} \cdot f_{oc}$$

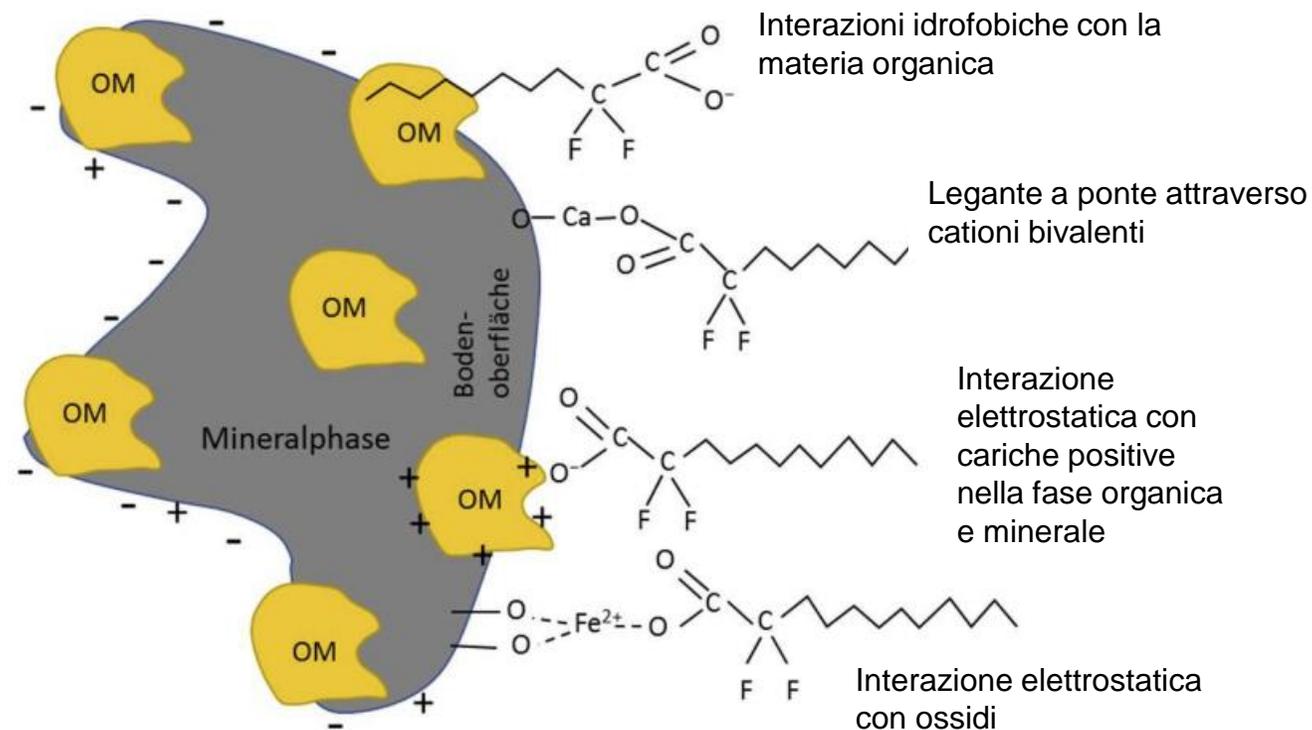
+ I solfonati (es. PFOS) si adsorbono più fortemente dei carbossilati (es. PFOA) a parità di lunghezza della catena

+ Adsorbimento influenzato da molti fattori:

- f_{oc} (frazione di carbonio organico nel suolo)
→ maggiore nel suolo superficiale
- **lunghezza della catena del PFAS**
- pH (\uparrow pH \rightarrow \downarrow K_D)
- contenuto di argille
- ...

PARAMETRI DOMINANTI

➔ **Adsorbimento difficile da prevedere**



Conceptual representation of the possible sorption mechanisms of PFAS to soils/subsoils or sediments (Li et al., 2018) The mechanisms are shown for a carbonic acid. They apply in the same way for a sulfonic acid. OM: organic material

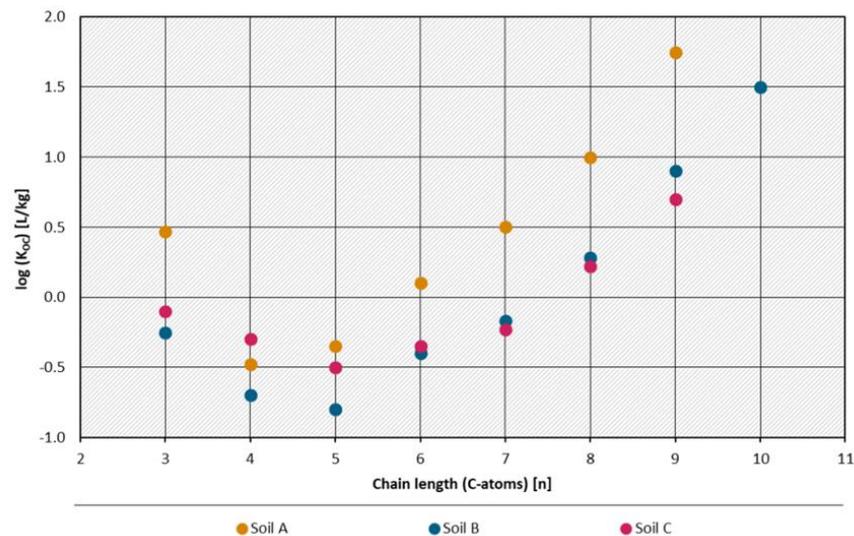
COMPORAMENTO AMBIENTALE

Adsorbimento

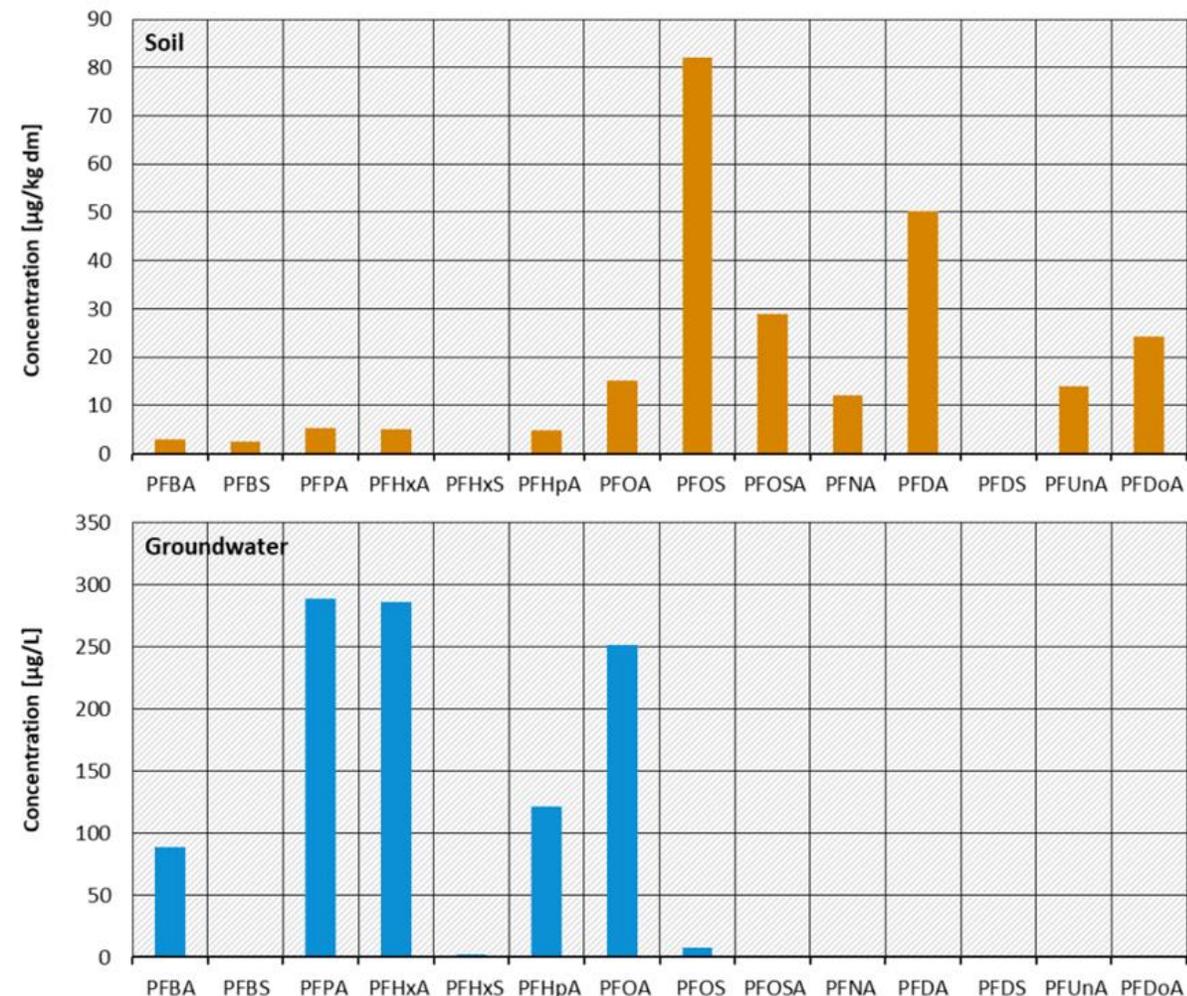
+ Fattori dominanti l'adsorbimento:

- f_{oc} (frazione di carbonio organico nel suolo)
- **lunghezza della catena** (i PFAS a catena più corta e ramificata sono trasportati più rapidamente delle molecole a catena più lunga e lineari)

+ Il PFSA sono più adsorbiti dei PFCA



La capacità di adsorbimento dei PFAS cresce con l'aumentare della lunghezza della catena.



Tipica distribuzione di vari PFAA nel suolo: quelli a catena lunga si ritrovano generalmente adsorbiti alla matrice solida, mentre quelli a catena corta si ritrovano preferenzialmente nell'acqua interstiziale. Inoltre il PFOS è più adsorbito del PFOA

COMPORAMENTO AMBIENTALE

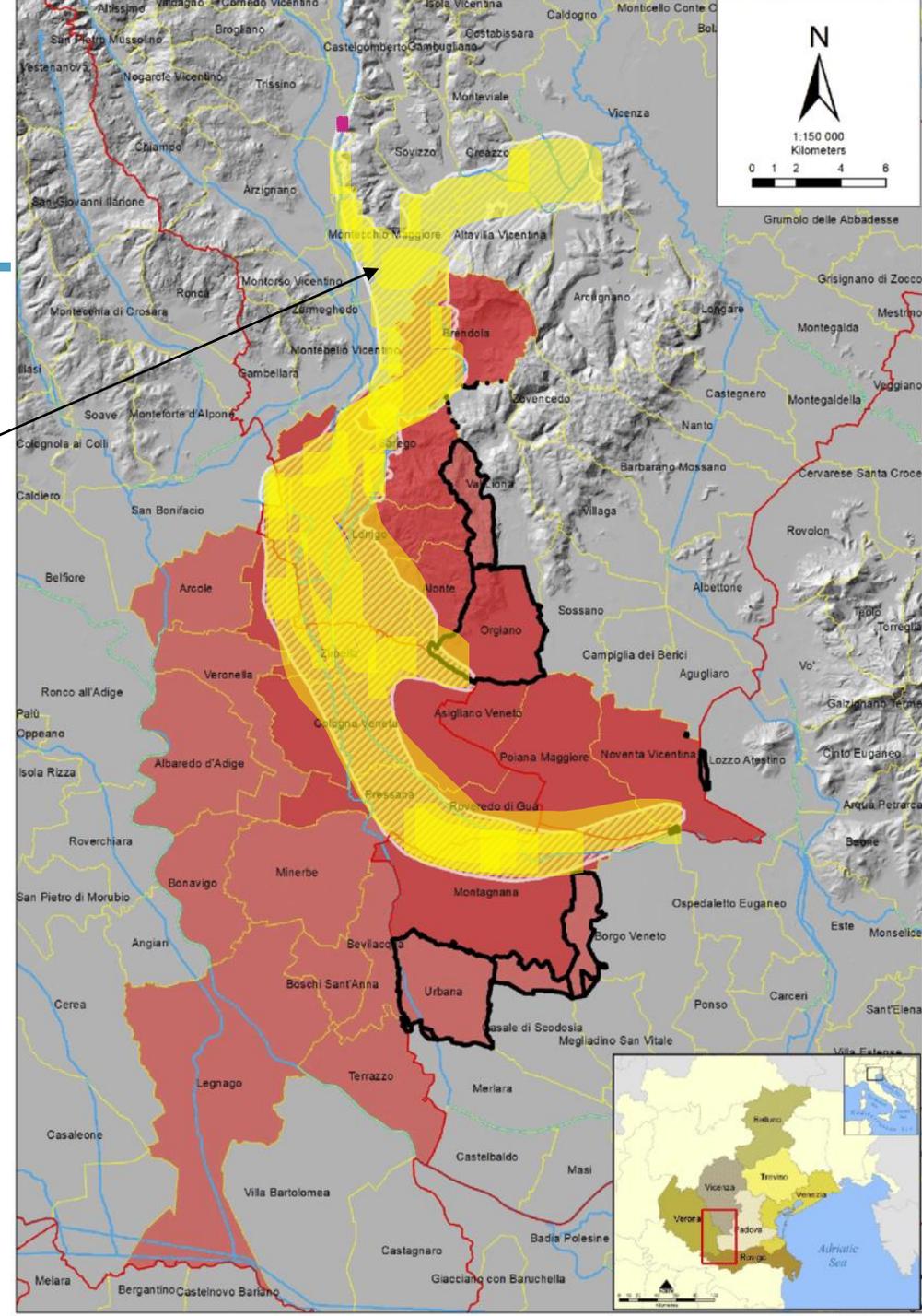
Trasporto e mobilità

- + I PFAS a catena più corta e ramificata sono trasportati più rapidamente delle molecole a catena più lunga e lineari
- + Il PFOS è più ritardato del PFOA
- + Poiché la maggior parte dei PFAS è relativamente mobile e solo leggermente ritardata durante il trasporto delle acque sotterranee, lunghi plume sono possibili (ad es. in Veneto >45 km). In media plume >1.5 km.

Plume di contaminazione da PFAS in falda in Veneto (in giallo)

Tab. 1: Examples of retardation factors of some PFAS (Vierke et al., 2014).

Connection	Retardation factor (R) [-]
PFBS	2.6
PFHxS	2.1
PFBA	1.9
PFHxA	9.9
PFOA	31.5
PFNA	23.5



BIODEGRADABILITA'

da PFAS

+ In linea generale, i PFAS non sono completamente biodegradabili (o mineralizzabili).

+ **Gli acidi perfluoroalchilici (PFAA) non sono praticamente soggetti a modifiche microbiche** (se non talvolta a un leggero accorciamento della catena che ne incrementa la mobilità).

+ Solo i precursori (composti polifluorurati, es. 6:2 FTOH) subiscono una parziale biodegradazione

➤ Si trasformano in PFAA a catena più corta persistenti non ulteriormente biodegradabili

+ I PFAS possono essere assorbiti dalle piante:

- Piante terrestri: hanno una preferenza per i PFAS a catena corta;
- Piante acquatiche: hanno una preferenza per i PFAS a catena lunga, in particolare PFOS.

Targeted PFAS (Conc., mg/L or mg/kg)	Microbial Species	Matrix Conditions	Major Products	Degradation Efficiencies ¹	Test Duration (days)	References
PFOA(0.1 or 100)	<i>Acidimicrobium</i> sp. strain A6 ³	Anaerobic	HFBA; PFPeA; PFHxA; PFHpA	63% (for 0.1 mg/L) and 50% for (100 mg/L) ²	100	Huang and Jaffé 2019
PFOS(0.1 or 100)	<i>Acidimicrobium</i> sp. strain A6 ³	Anaerobic	HFBA; PFBS	60% (for 0.1 mg/L) and 47% for (100 mg/L) ²	100	Huang and Jaffé 2019
PFOA and PFOS(5 for each)	Mixed culture	Aerobic or anaerobic sludge	Not reported	~0% for aerobic; ~100% for anaerobic ²	~30	Meesters and Schröder 2004
PFOA(500)	<i>Pseudomonas parafulva</i> strain YAB1 ³	Aerobic	Not reported	48% ²	5	Yi et al. 2016
PFOS(1.8)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> strain HJ4 ³	Aerobic	PFBS; PFHxS	67% ²	2	Kwon et al. 2014
PFOS(1,000)	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> 2.4-D ³	Aerobic soil	Not reported	75% ²	90	Chetverikov et al. 2017
PFOS(1,000)	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> 2.4-D ³	Aerobic mineral medium	PFHpA	100% ²	6	Chetverikov et al. 2017
6:2 FTAA(1.5)	Mixed culture	Aerobic sludge	6:2 FTSA; 6:2 FTOH; 5:3 FTCA; PFPeA; PFHxA; PFBA	~12%	109	D'Agostino and Mabury 2017
6:2 FTAB(1.5)	Mixed culture	Aerobic sludge	6:2 FTSA; 6:2 FTOH; 5:3 FTCA; PFPeA; PFHxA	~3%	109	D'Agostino and Mabury 2017
6:2 FTSAS(2)	Mixed culture	Aerobic sludge	6:2 FTOH; 6:2 FTUCA; 6:2 FTCA; 5:3 FTCA; PFPeA; PFHxA; PFHpA	~32%	42	Weiner et al. 2013
6:2 FTSA(1.8–2.6)	Mixed culture	Aerobic sludge	5:2 sFTOH; 5:2 Ketone; PFPeA; PFHxA	~6%	90	Wang et al. 2011
6:2 FTSA(~1.3)	Mixed culture	Aerobic or anaerobic sediment	6:2 FTCA; 6:2 FTOH; 5:2 sFTOH; 5:2 Ketone; 5:3 Acid; PFPeA; PFHxA;	~80% for aerobic; 0% for anaerobic	100	Zhang et al. 2016
6:2 FTSA(25.6)	<i>Gordonia</i> sp. strain NB4-1Y ³	Aerobic	6:2 FTCA; 6:2 FTUA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; 6:2 FTOH	~88%	7	Shaw et al. 2019
6:2 FTAB(~34.2)	<i>Gordonia</i> sp. strain NB4-1Y ³	Aerobic	6:2 FTCA; 6:2 FTUA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; 6:2 FTOH	~85%	7	Shaw et al. 2019
4:2 FTOH(0.01)	Mixed culture	Aerobic landfill soil	PFPeA; PFBA; TFA	~28%	32	Sun et al. 2020
6:2 FTOH(2.8)	Mixed culture	Aerobic sludge	6:2 FTUA; 5:2 sFTOH; 6:2 FTCA; 5:3 Acid; PFHxA	~60%	90	Liu et al. 2010
6:2 FTOH(2.9)	Mixed culture	Aerobic soil	PFPeA; 5:3 Acid; PFHxA; 5:2 sFTOH; 6:2 FTOH; PFBA	~67%	180	Liu et al. 2010
6:2 FTOH(1.6)	Mixed culture	Anaerobic sludge	6:2 FTCA; 6:2 FTUCA; 5:3 Acid;	~70%	181	Zhang et al. 2013
6:2 FTOH(4.125)	<i>Mycobacterium vaccae</i> JOB5 ³	Aerobic	6:2 FTCA; 6:2 FTUCA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; 5:3 Acid; 5:3 U Acid	71–76%	28	Kim et al. 2014
6:2 FTOH(4.125)	<i>Pseudomonas fluorescens</i> DSM 83,413	Aerobic	6:2 FTCA; 6:2 FTUCA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; 5:3 Acid; PFHxA	~110%	28	Kim et al. 2014
6:2 FTOH(4.125)	<i>Pseudomonas oleovorans</i> ³	Aerobic	6:2 FTUCA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; 5:3 Acid; 5:3 U Acid; PFHxA	58–81%	28	Kim et al. 2014
6:2 FTOH(4.125)	<i>Pseudomonas butanovora</i> ³	Aerobic	6:2 FTCA; 6:2 FTUCA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; 5:3 Acid; 5:3 U Acid; PFHxA	87–113%	28	Kim et al. 2014
6:2 FTOH(3)	<i>Gloeophyllum trabeum</i> ⁴	Aerobic	5:3 Acid; 6:2 FTUCA; PFHxA; 6:2 FTCA; 5:2 Ketone; PFBA	~23%	28	Merino et al. 2018
6:2 FTOH(3)	<i>Trametes versicolor</i> ⁴	Aerobic	5:3 Acid; 6:2 FTUCA; 5:2 Ketone; 5:2 sFTOH; PFHxA	~6%	28	Merino et al. 2018
6:2 FTOH(1.7)	<i>Phanerochaete chrysosporium</i> ⁴	Aerobic	5:3 Acid; 5:2 sFTOH; PFHxA; 6:2 FTUCA; PFPeA	~40%	28	Tseng et al. 2014
8:2 FTOH(~0.18)	Mixed culture	Anaerobic sludge	7:3 Acid; 8:2 FTCA; 8:2 FTUCA	~55%	181	Zhang et al. 2013
Trifluoropentanoic Acid (500)	Mixed culture	Aerobic sludge	Not reported	~6% ²	224	Ochoa-Herrera et al. 2016
MeFBSE(976)	Mixed culture	Anaerobic sludge	MeFBSAA; PFBSI	97%	108	Lange 2018
EtFOSE(1010)	Mixed culture	Anaerobic sludge	EtFOSAA; PFOSI	2%	108	Lange 2018
PFAA precursors(Not available)	Mixed culture	Anaerobic sludge	C5–C7 PFCA; PFBS	Not available	60	Li et al. 2021

¹ The degradation efficiency is quantified by the sum of quantified metabolites based on molar percentages of the initial PFAS contaminants.

² The number represents the overall removal of the initial PFAS contaminants due to the lack of metabolites quantification.

³ Bacterial species.

⁴ Fungal species.

NORMATIVA

Parola d'ordine: incertezza

Sostanze chimiche PFAS da limitare

Ultima modifica: 06 giugno 2023 15:15

 Ascolta

 Stampa

L'uso di sostanze polifluoroalchiliche (PFAS), considerate dannose per l'organismo, va limitato. Lo chiede una mozione della "senatrice" Marianne Maret (Centro/VS) approvata martedì anche dal Consiglio nazionale (per 134 a 53). **Il governo è così stato incaricato di determinare valori limite sia per quanto riguarda la concentrazione nel suolo e nel sottosuolo sia per lo smaltimento di materiali e l'immissione nelle acque di scarico.** I PFAS sono sostanze difficilmente biodegradabili, utilizzate industrialmente già da decenni e ormai presenti in diversi siti in Svizzera. Con valori limite i cantoni avrebbero una sicurezza giuridica per trattare siti inquinati.

 Condividi

Pubblicato il: 06 giugno 2023, 11:41 Ultima modifica il: 06 giugno 2023, 15:15

ALTRE

Il Papa e



NORMATIVA

Probabili limiti di risanamento in Svizzera

+ Attualmente, **assenza di limiti federali ufficiali**.

+ UFAM sta elaborando limiti ufficiali per acque e terreni: probabile prima pubblicazione nel 2024.

+ Limiti acque potabili (UE):

- «Somma 20 PFAS»: 0,1 µg/L

+ Probabili limiti UFAM **acque sotterranee**:

- PFOA: < 0,5 µg/L
- PFOS: < 0,03 µg/L (vs. limite BaP 0,05 µg/L)
- PFAA catena corta: ~1 µg/L

+ Probabili limiti UFAM per **terreni**:

- uso industriale/commerciale: << 5 mg/kg
- uso verde/residenziale: << 0,5 mg/kg

Tab. 3: Current site-specific concentration values for PFASs

Connection	Abbreviation	CAS No.	K value [µg/L]
Perfluorobutanoic acid	PFBA	375-22-4	700
Perfluoropentanoic acid	PFPeA	2706-90-3	100
Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4	25
Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	375-85-9	1.5
Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1	0.5
Perfluorobutanesulfonic acid	PFBS	375-73-5	350
Perfluorohexane sulfonic acid	PFHxS	355-46-4	0.7
Perfluorooctane sulfonic acid	PFOS	1763-23-1	0.7
6:2-Fluorotelomer sulfonic acid	H4PFOS	27619-97-2	7

Valori sito specifici calcolati per alcuni composti in via temporanea.
 Fonte: UFAM

INDICE

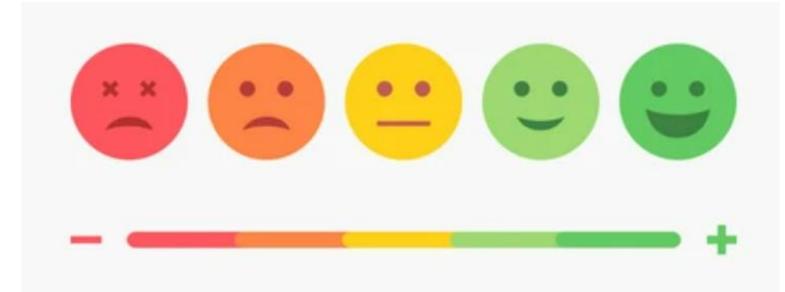
- 1 Introduzione e revisione concetti fondamentali
- 2 **Tecnologie di risanamento e matrice di valutazione multicriterio**



VALUTAZIONE MULTICRITERIO DELLE TECNOLOGIE DI RISANAMENTO

Allegato A – Matrice di valutazione delle metodologie per il risanamento dei PFAS

Si è deciso di operare una classificazione soggettiva delle metodologie con 4 colori differenti per ogni criterio (efficacia, costi, ecc.), con dunque significato diverso e giudizio relativo al confronto con le altre tecnologie analizzate:

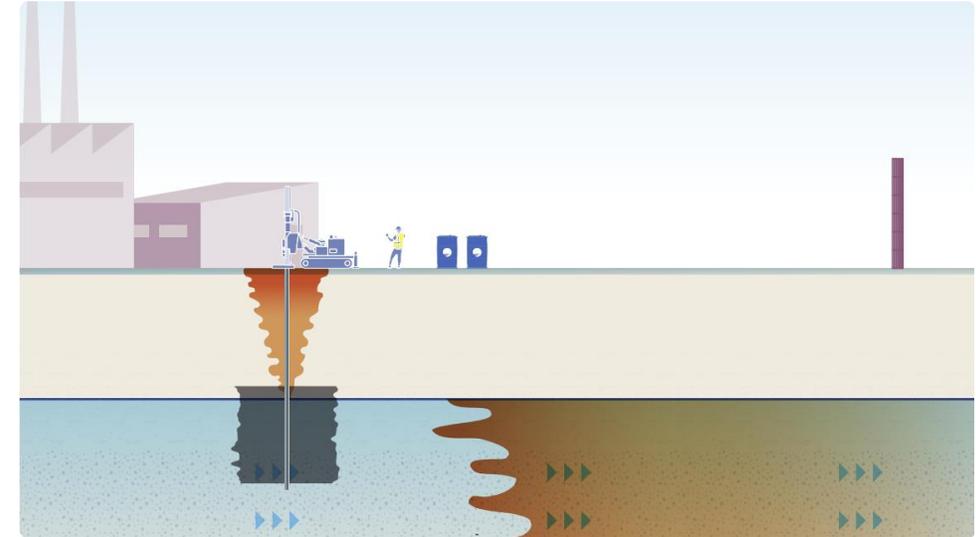


- + **Rosso** = NON SUFFICIENTE: inefficace, non disponibile, improbabile sviluppo in tempi brevi...;
- + **Arancione** = SCARSO: poco efficace, scarsa disponibilità commerciale, scarse probabilità di essere applicata su scala tecnica;
- + **Giallo** = DISCRETO: probabilmente applicabili, ma con ancora poche dimostrazioni o alcune incertezze sull'efficacia;
- + **Verde** = BUONO: disponibili ed efficaci.

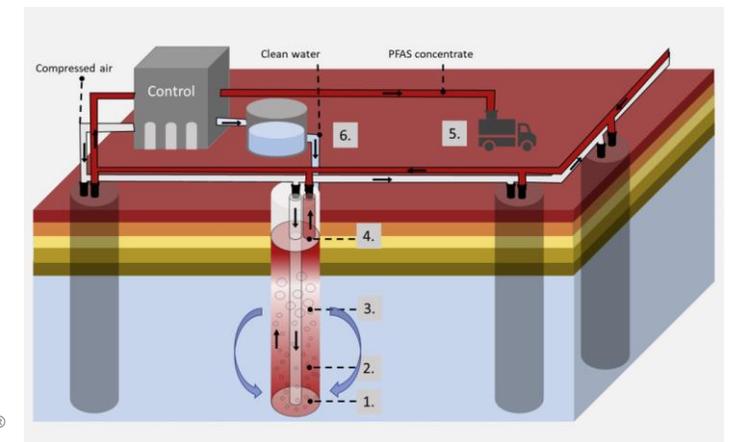
CRITERI DI VALUTAZIONE

Ogni metodologia è stata valutata sotto i seguenti aspetti:

- + Applicabilità a seconda delle **caratteristiche del terreno**:
 - ❑ Texture/tipologia (distribuzione granulometrica)
 - ❑ Saturo/insaturo
 - ❑ Permeabilità alta/bassa
- + Applicabilità a seconda della **tipologia di contaminante** (catena lunga/corta, precursori).
- + **Efficacia/efficienza.**
- + **Stadio di sviluppo** della tecnologia (commerciale/sperimentale), valutando anche possibili potenziali immissioni sul mercato a breve termine.
- + **Tempi** di bonifica.
- + **Costi.**
- + **Sostenibilità ambientale** complessiva dell'intervento: rifiuti, impronta carbonio, consumo energetico...



Source: REGENESIS®



Source: OPEC-Systems®

Matrice di valutazione multicriterio delle tecnologie

Allegato A, due fogli (in-situ e ex-situ)

TECNOLOGIE IN-SITU		BREVE DESCRIZIONE TECNOLOGIA	GRADO DI MATURITA' (COMMERCIALE/SCALA PILOTA/ LABORATORIO/TEORICO)	EFFICACIA	PFAA CATENA LUNGA	PFAA CATENA CORTA	PRECURSORI	ZONA INSATURA	ZONA SATURA	FINE/BASSA PERMEABILITA'	GROSSOLANO/ALTA PERMEABILITA'	CO ₂	TEMPI =anni m=mesi s=settimane	RESIDUI S=solidi L=liquidi G=gassosi	ENERGIA/CO ₂ su LCA	ALTRO/COMMENTI			
IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU (Stabilizzazione e/o Solidificazione)	Carbone attivo colloidale (CAC)	SourceStop™ Carbone attivo colloidale (CAC) "liquido" da miscelare al terreno insaturo in zona sorgente (alta conc. PFAS), eventualmente assieme a PAC, per immobilizzare gli inquinanti ed eliminare il rischio di lisciviazione, ossia di trasferimento in falda. SourceStop può essere anche applicato a spruzzo sul fondo dello scavo del terreno della zona sorgente per creare una barriera orizzontale adsorbente di CAC	3 siti pilota	>99% nella riduzione della lisciviazione				SourceStop (+ PAC) miscelati in zona sorgente e/o barriera orizzontale a spruzzo su fondo scavo zona sorgente prima di riposizionare il terreno	in teoria OK solo per iniezioni in zone sorgenti in falda/frangia capillare (non ancora provato su campo)	difficile miscelazione		10-500 CHF?	s/m	/		blocca ma non rimuove la contaminazione			
		PlumeStop™ Carbone attivo colloidale (CAC) "liquido" da iniettare in acquifero come barriera permeabile (PRB) in situ, formando un "filtro" di CAC che elimini il propagarsi del plume di PFAS a valle, adsorbendo i PFAS in situ all'interno della PRB	commerciale, applicato su 41 siti	90-99% attenuazione del plume	effetto cromatografico			PlumeStop ha eccessiva mobilità e trasporto lungo la verticale	iniettato come PRB	difficile dispersione	difficoltà se velocità falda troppo elevata		-2 CHF/m ³ acqua sotterranea 10k-15k CHF/metro di barriera	s/m	/	emissioni di CO ₂ 40-70 volte inferiori rispetto a P&T	blocca ma non rimuove la contaminazione. Da replicare dopo alcuni anni (10+ ?)		
	Altre (argille modificate, resine, cemento...)																		
	Desorbimento termico (in-situ) 300-400 °C	Riscaldamento del suolo per conduzione termica (TCH) mediante pozzi termici (resistor) nel terreno per desorbire e volatilizzare i PFAS, che saranno raccolti tramite un sistema di estrazione vapori (SVE) e adeguatamente trattati	tecnologia consolidata, ma per i PFAS usata in pochi siti. Le T da raggiungere sono più elevate dei classici utilizzi	>99% rimozione PFAS dal terreno	T maggiori per desorbire e volatilizzarli		?		maggiore consumo di energia per riscaldamento acqua maggiore produzione di vapore da trattare in superficie allungo da raggiungere delle acque di falda da morte abbassa le temperature	difficoltà SVE				- energia elettrica - noleggio tecnologia (brevettata) - alti densità di riscaldatori necessaria	G+S+L - delicato trattamento vapori e condensato - GAC esausto da incenerire	CO ₂ da produzione di energia elettrica			
	Frazionamento della schiuma (FF) in-situ	Pozzi speciali in situ con immissione di aria compressa sul fondo che risalendo sotto forma di bolle porta a "schiumare" i PFAS tensioattivi, che vengono estratti dalla superficie del pozzo e trattati on-site, mentre la continua immissione di aria crea una circolazione radiale dell'acqua da e verso i pozzi	- concettuale, esperimento in colonna in lab - un paio di aziende - la ricerca si sta concentrando sullo stesso principio ma applicato al trattamento delle acque ex-situ	- in lab: rimozione 99% PFOA/PFOS in soluzione - in situ: non provato. Probabili difficoltà di modellizzazione ed efficienze ridotte (max ca. 90%?)		- non schiumano come quelli a catena lunga: efficienze anche dello 0% - sperimentazione in campo su aggiunti per aumentare l'efficienza su PFAS a catena lunga			efficacia della circolazione dell'acqua sotterranea (corticicirca)? raggio di influenza? efficacia della testa di estrazione della schiuma e reimmissione acqua	difficile circolazione acque			?	Sicuramente un costo importante lo rivestono i pozzi speciali, dipende dal loro numero ovvero dal raggio di influenza	in laboratorio la tecnologia si è rivelata molto rapida nello far schiumare la maggior parte dei PFAS in tempi brevi	L/S (fanghi)	?	- non è mai stato applicato in situ - blocco della circolazione per precipitati delle forme ossidate di Fe e Mn, o microorganismi - parte delle valutazioni qui riportate si riferiscono al processo di frazionamento della schiuma applicato al trattamento delle acque ex-situ (come concettuale)	
	Soil Flushing (lavaggio in-situ)	Irrigazione intensiva del terreno insaturo per forzare l'eluizione dei PFAS e trasportarli in falda, da cui sono raccolti da un sistema di P&T che tratta l'acqua in superficie e ne riusa una parte per proseguire l'irrigazione del terreno, spesso aggiungendo solventi (es. etanolo)	lab: 1 studio (PFOS)	- da dimostrare in campo - in lab: 98% per PFOS con soluzione al 50% etanolo - possibile scarsa efficacia alle basse concentrazioni - eterogeneità dei suoli reali possono creare percorsi preferenziali	eluiscono molto		?	- max 5 m - basso foc	indirettamente mediante P&T (o PRB)	lunghi tempi di infiltrazione				presumibilmente contenuti, se si considera la bonifica della sola parte insatura/sorgente, ma complessivamente elevati dato P&T		S (GAC) +L	P&T + GAC	potenzialmente interessante, si attendono applicazioni pilota	
	Fitorisanamento (fitoestrazione)	Fitoestrazione dei PFAS dal terreno mediante specie vegetali che li peraccumulano nella loro biomassa. Tali piante una volta cresciute vengono raccolte e smaltite (incenerimento).	sperimentale per i PFAS	tassi di accumulo troppo bassi		più facilmente assorbiti dalle piante terrestri	?		necessità radici profonde	?	?		?	Se numero di ripiantumazioni elevato (dati bassi tassi estrazione), allora alti costi		S (piante, inceneritori speciali >1100°C, no centrali biomassa)		ricerche di specie utili in corso	
	Smoldering (combustione in-situ)	Miscelazione di un combustibile (es. carbone attivo esausto) al terreno e successivo innescò di una reazione di combustione senza fiamma (smoldering) mediante apporto di ossigeno, con il combustibile fonte di calore autosostenuta e il fronte di combustione che si allarga lentamente a tutta la zona da trattare degradando termicamente i PFAS e producendo fumi da prelevare e trattare adeguatamente. Il medesimo processo si può applicare in reattori ex-situ	usata per NAPL idrocarburi petrolio, ma per PFAS è lab/concettuale (esperimenti pilota ex situ positivi)	ok in lab, ma difficoltà a scala tecnica (trattamento fumi pericolosi)	?	?	?	?		?	?		?	Recupero e trattamento fumi		G pericolosi (+S, L trattamenti)	depende se combustione di rifiuti o combustibile vergine	- anche ex-situ in reattori on-site - difficilmente troverà molte applicazioni in futuro	
	Biodegradazione microbica	Stiramento di microrganismi adatti alla biodegradazione dei PFAS, eventualmente assistendo la biodegradazione mediante apporto di O ₂ substrati ecc.	possibile dispersione in 1-2 anni?	nessuna generalizzazione completa dei PFAS	degradati a PFAA a catena corta	non degradati oltre	degradati a PFAA persistenti	?	?	?	?			?	Probabile necessità di grande "assistenza" alla biodegradazione		a	depende da n° applicazioni ORC/HRC o BV/BS	se funzionano, di probabile difficile applicazione (sopravvivenza microrganismi specifici)

Estratto esemplificativo

SITUAZIONE ATTUALE

Tecniche maggiormente utilizzate ad oggi nei casi di contaminazioni da PFAS

+ Scavo del terreno

soprattutto per la zona insatura

Trattamenti ex-situ:

- Discarica
- Incenerimento
- Soil Washing

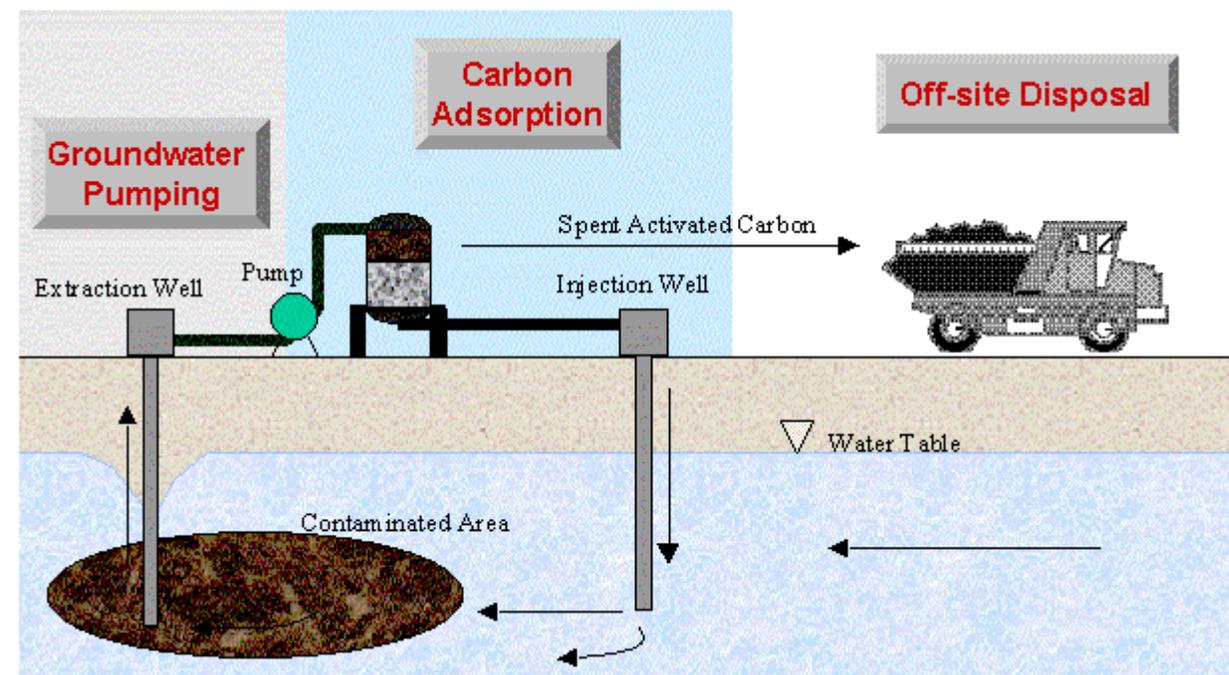
+ Pump & Treat

per la falda

Trattamento acque:

- Carbone attivo granulare (GAC)
 - Resine a scambio ionico

...



Metodologie di bonifica EX-SITU (Allegato A, foglio 1)

Sommario

Metodo	On-site/off-site	Breve descrizione
Smaltimento in discarica	Off-site	Escavazione e conferimento in discariche adatte per lo smaltimento
Incenerimento ad alta temperatura	Off-site	Escavazione e conferimento a impianti per l'incenerimento di rifiuti pericolosi dove il terreno è trattato in forno rotante ad alte temperature (>1100°C) + camera di post-combustione dei fumi e i PFAS sono completamente mineralizzati (distrutti). L'impianto ha un adeguato sistema di trattamento fumi
Desorbimento termico ex-situ	On-site/Off-site	Invece di incenerirlo, il terreno viene riscaldato in appositi reattori (on- o off-site) a temperature inferiori (400-950°C) in assenza di ossigeno, in modo tale da desorbire e trasferire i PFAS in fase gas e poi ossidare tali gas a temperature elevate (>1100°C) in un post-combustore, distruggendo i PFAS. Il suolo trattato può teoricamente essere riciclato
Cementificio	Off-site	Il terreno contaminato è usato come additivo nella miscela di farina grezza che verrà cotta nel forno rotante per la produzione del clinker (e successivamente del cemento). I PFAS sono distrutti alle temperature del forno (ca. 1400°C) e/o inglobati nella matrice minerale del clinker
Pump & Treat	On-site	Le acque di falda contaminate vengono estratte tramite pozzi e successivamente pulite in strutture adeguate (ad es. sopra torri di GAC)
Soil Washing (impianto di lavaggio terre)	On-site/Off-site	Lavaggio del terreno in impianto on/off-site con acqua (+eventuali additivi) per desorbire i contaminanti dalla frazione grossolana (che può essere riciclata) e portarli in soluzione e/o sulla frazione fine (che andrà a incenerimento)
Altre (vedi Allegato A)		Degradazione mediante enzimi fungini, processo ball-mill, degradazione mediante enzimi fungini...

CONFERIMENTO IN DISCARICA

Problematiche

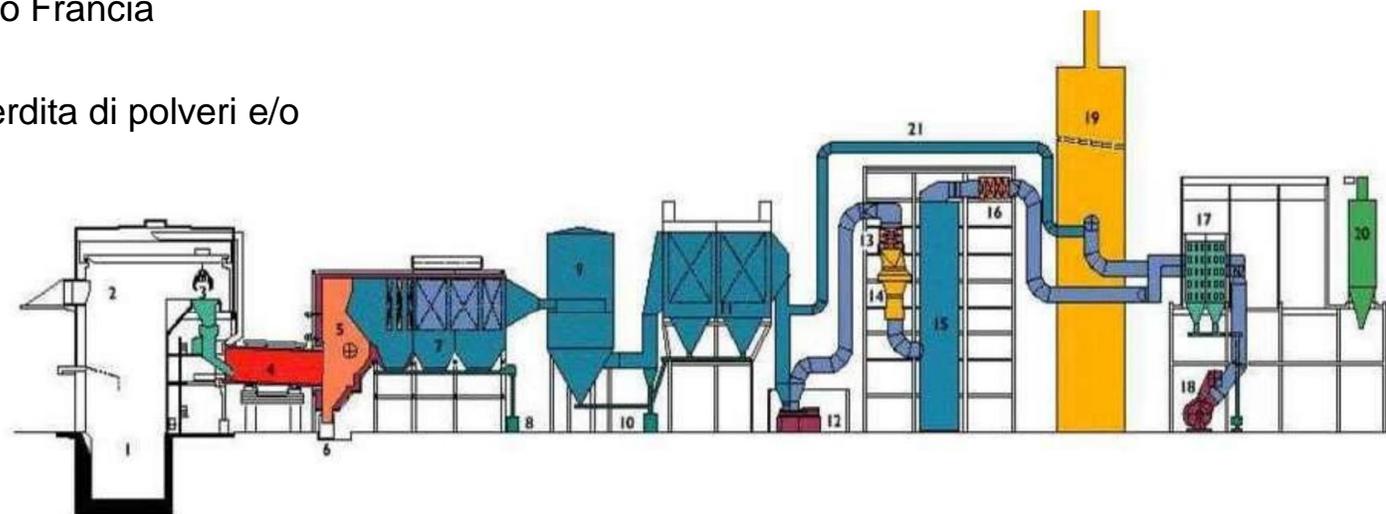
- + Assenza limiti ufficiali per rifiuti
- + Reticenza degli operatori ad accettare rifiuti contenenti PFAS → **praticamente nessuna discarica in Svizzera oggi accetta terreni contaminati da PFAS**
- + Difficoltà nel trattamento dei PFAS dal percolato di discarica
→ possibile reimmissione in ambiente
- + Non sostenibile (consumo di suolo, produzione di rifiuti, emissioni di trasporto)
- + Trasporto:
 - Grandi quantità di mezzi
 - Emissioni di CO₂
 - Perdita di polveri e/o percolato



INCENERIMENTO AD ALTA TEMPERATURA

Inceneritori di rifiuti pericolosi

- + A temperature $> 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ → distruzione completa PFAS
- + Inceneritori di rifiuti pericolosi
- + Efficace nell'eliminare definitivamente la contaminazione
- + Impianti allo stato dell'arte per quel che concerne il trattamento delle emissioni atmosferiche
- + ✗ Nessun impianto utile in Svizzera → export in Germania o Francia
- + ✗ Trasporto (grandi quantità di mezzi, emissioni di CO₂, perdita di polveri e/o percolato)
- + ✗ Residui (scorie, ceneri, acque reflue) e perdita del suolo



In alto: forno rotativo di incenerimento. In basso: schema di un inceneritore per rifiuti pericolosi in Germania, con la linea di trattamento fumi (da 9. in poi) in evidenza

DESORBIMENTO TERMICO EX-SITU

On-site o off-site

- + Riscaldamento del terreno in reattori a temperature di 400-950°C in assenza di ossigeno → desorbimento dei PFAS
- + Trattamento dei gas desorbiti in un post-combustore termico o catalitico per la distruzione dei PFAS
- + Potenziale recupero del suolo trattato, no scorie
- + ✗ Tempi di processo più lunghi → output orari inferiori
- + ✗ Pochi impianti e pochi esperimenti con PFAS
- + ✗ Consumo di combustibile



Un'unità portatile di trattamento termico a infrarossi per terreni contaminati da PFAS

CEMENTIFICI

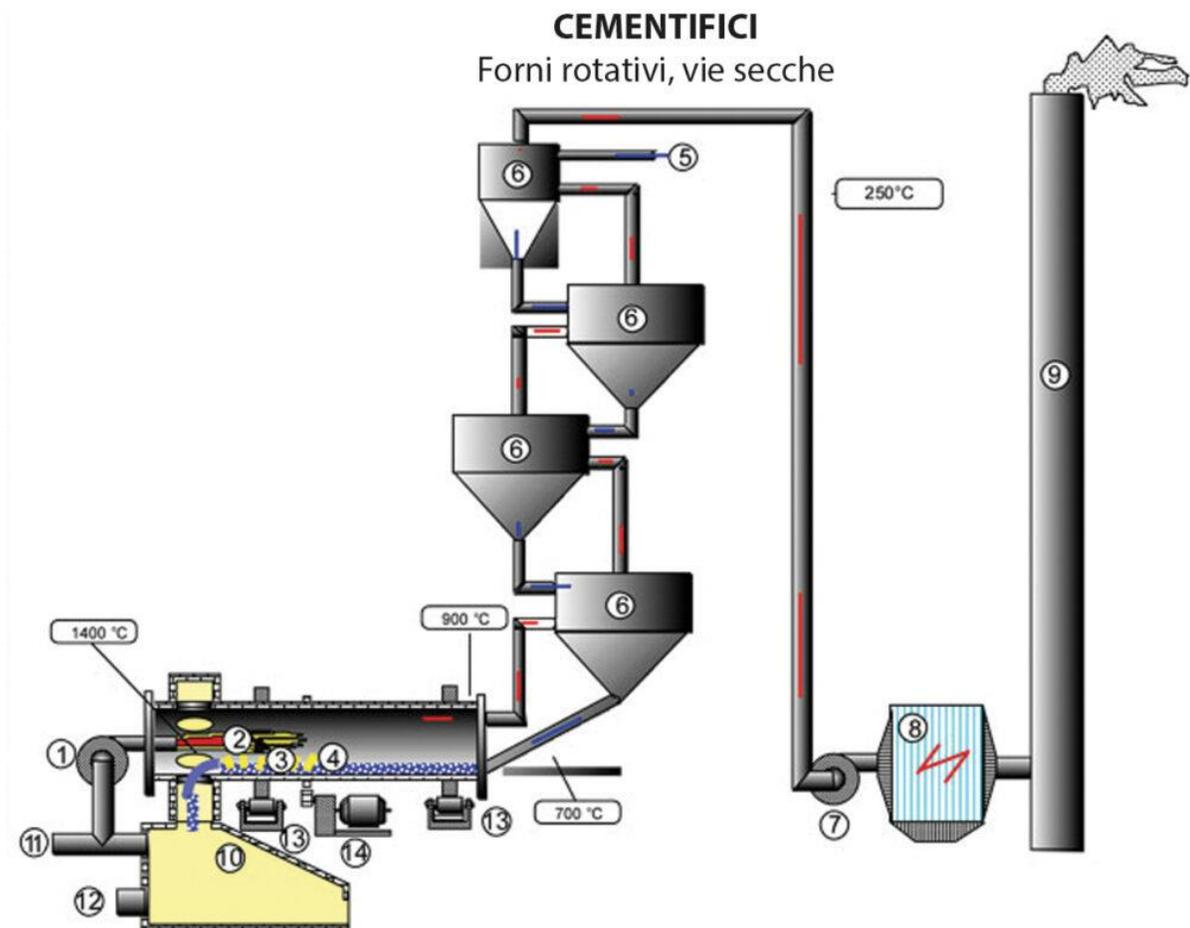
Additivo alla farina grezza

Aggiungere il terreno contaminato alla farina grezza in ingresso all'impianto per la produzione di clinker e poi di cemento

- + Nei forni dei cementifici $T > 1400\text{ °C}$ → distruzione completa PFAS
- + Numero cospicuo di impianti in Svizzera e la pratica dello smaltimento di rifiuti in cementificio è consolidata
- + Nessun rifiuto solido → inglobato nel clinker
- + Non risultano sperimentazioni con terreno contaminato da PFAS
- + Se il terreno contaminato viene inserito insieme alla farina in punti in cui la temperatura non è sufficientemente alta per la distruzione ma sufficiente per la volatilizzazione dei PFAS, questi potrebbero parzialmente volatilizzarsi ed essere liberati in ambiente tramite il camino

⇒ Risoluzione possibile mediante modifiche impiantistiche:

- Installazione di un post-combustore nella linea fumi
- Immissione del terreno con PFAS direttamente nei punti in cui le temperature sono oltre i 1100 °C (ad es. direttamente nel forno)



Schema semplificato di impianto di un cementificio, con evidenziati i vari valori di temperatura lungo la linea

PUMP & TREAT

Una visione d'insieme dei trattamenti applicabili alle acque sotterranee estratte

- + Tante nuove tecnologie allo studio per il trattamento delle acque emunte
- + Tradizionalmente i rimedi più utilizzati sono:
 - filtrazione su **carbone attivo** granulare (GAC)
 - **resine a scambio ionico**
 - diventa critica la corretta scelta del giusto adsorbente/resina (test preliminari in lab)
- + In corso sperimentazioni promettenti a scala pilota del **frazionamento della schiuma** precedente al GAC per ridurre il consumo di quest'ultimo.
- + Interesse verso tecnologie che portino alla distruzione diretta dei PFAS dalle acque piuttosto che a un loro trasferimento su un'altra fase (es. su GAC):
 - Ossidazione elettrochimica
 - Ossidazione con acqua in stato supercritico
 - **promettenti ma consumi energetici elevati**

PFAS Treatment Technologies for Water

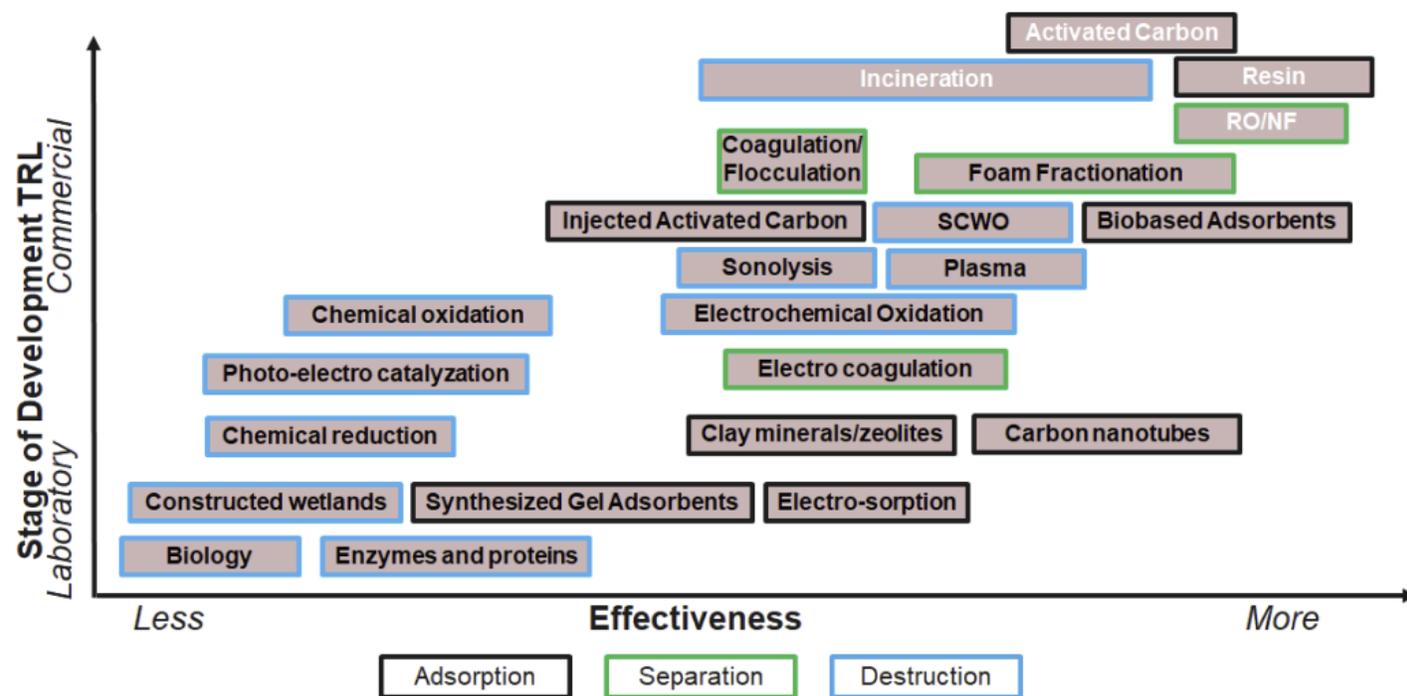
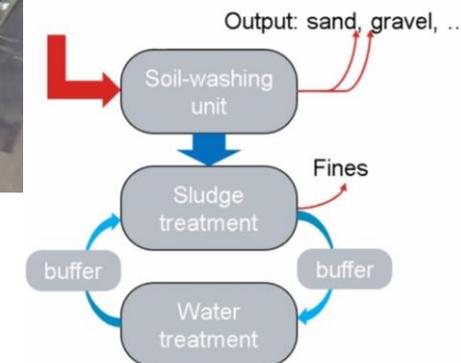
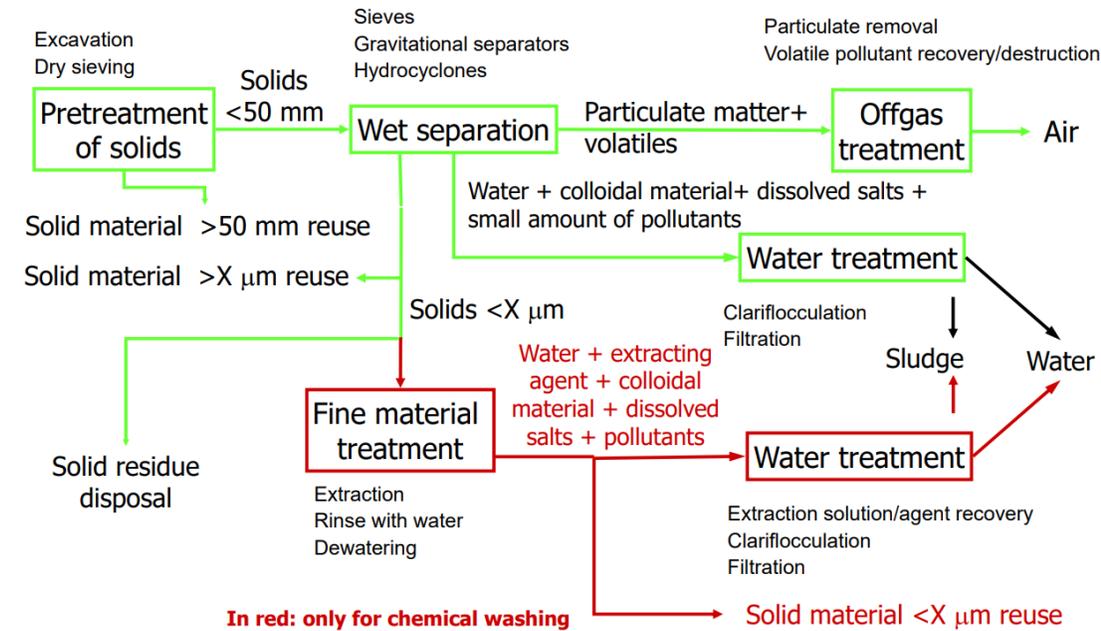


Figure 8: Treatment Technologies for Water (SCWO: Super critical Water Oxidation, RO/NF: Reversed Osmosis/Nano Filtration)

SOIL WASHING

Lavaggio del terreno ex-situ

- + Lavaggio del terreno con acqua (+ eventuali additivi) per desorbire i contaminanti dalla frazione grossolana (che può essere riciclata) e portarli in soluzione e/o sulla frazione fine (che andrà a incenerimento)
- + La soluzione di lavaggio viene continuamente purificata (es. chiariflocculazione + GAC/resine/FF...) e ricircolata → no scarico acque reflue, ma produzione fanghi → a incenerimento.
- + In genere impianti specializzati off-site (es. Zurigo), ma in caso di grandi volumi è teoricamente possibile il noleggio on-site
- + Una delle tecnologie al momento più promettenti e in crescente uso per il trattamento di terreni contaminati da PFAS, con diversi fornitori internazionali e nazionali
- + Potenziale di recupero del terreno grossolano pulito, che a seconda della concentrazione residua potrà essere reimpiegato in loco o ad es. nella produzione di calcestruzzo
- + Applicabile solo su terreni con poco fine (< 20-35%)
- + Considerevole utilizzo di GAC (o soluzioni rigeneranti per resine a scambio ionico) per il trattamento delle acque di lavaggio



Metodologie di bonifica IN-SITU (Allegato A, foglio 2)

Sommario

Metodo	Saturo/insaturo	Breve descrizione
Immobilizzazione in-situ (Stabilizzazione e/o Solidificazione)	Saturo/insaturo	Mix di reagenti (PAC, CAC, resine, argille...) col suolo per ridurre la mobilità dei PFAS e non permetterne la lisciviazione di quantità rilevanti + eventuale solidificazione (cemento).
Soil Flushing (eluizione/lavaggio in-situ)	Insaturo	Irrigazione intensiva del terreno insaturo per forzare l'eluizione dei PFAS e trasportarli in falda, da cui sono raccolti da un sistema di P&T che tratta l'acqua in superficie e ne riusa una parte per proseguire l'irrigazione del terreno, spesso aggiungendo solventi (es. etanolo)
Fitorisanamento (fitoestrazione)	Insaturo	Fitoestrazione dei PFAS dal terreno mediante specie vegetali che li iperaccumulano nella loro biomassa. Tali piante una volta cresciute vengono raccolte e smaltite (incenerimento).
Frazionamento della schiuma (F/F) in-situ	Saturo	Pozzi speciali in situ con immissione di aria compressa sul fondo che risalendo sotto forma di bolle porta a "schiumare" i PFAS tensioattivi, che vengono estratti dalla superficie del pozzo e trattati on-site, mentre la continua immissione di aria crea una circolazione radiale dell'acqua da e verso i pozzi
Desorbimento termico in-situ	Insaturo/Saturo	Riscaldamento del suolo per conduzione termica (TCH) mediante pozzi termici (resistori) nel terreno per desorbere e volatilizzare i PFAS, che saranno raccolti tramite un sistema di soil vapor extraction (SVE) con adeguato trattamento dei vapori
Smoldering (combustione in-situ)	Insaturo	Miscelazione di un combustibile (es. carbone attivo esausto) al terreno e successivo innesco di una reazione di combustione senza fiamma (smoldering)
Biodegradazione microbica	?	Sfruttamento di microrganismi adatti alla biodegradazione dei PFAS, eventualmente assistendo la biodegradazione mediante apporto di O ₂ , substrati ecc.

IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU

Stabilizzazione e/o Solidificazione

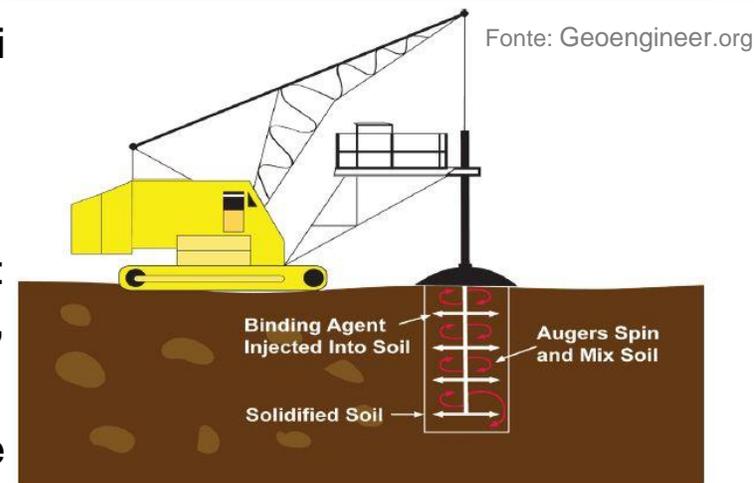
Obiettivo: ridurre l'eluizione (lisciviazione) dei contaminanti attraverso la miscelazione di composti al terreno.

Come?

- **Stabilizzazione** (chimica/fisica): ridurre la solubilità degli inquinanti in acqua: precipitazione, cambiamento di stato di ossidazione, adsorbimento/assorbimento...
- **Solidificazione** (fisica): rendere la matrice impermeabile all'acqua riduce l'infiltrazione e dunque l'esposizione dei contaminanti alla lisciviazione. Si usano in genere leganti idraulici come il **cemento** e/o la **bentonite**.

Diversi reagenti per la stabilizzazione, che sfruttano principalmente l'adsorbimento:

- + **carbone attivo** in polvere (PAC) e/o colloidale (CAC)
- + **argille** organiche modificate
- + **AlOH** amorfo
- + Mercato dinamico con nuovi prodotti brevettati immessi regolarmente sul mercato



IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU – Carbone attivo colloidale (CAC)

SourceStop™

Obiettivo: trattamento delle **zone sorgenti** per eliminare la migrazione verticale dei PFAS nel terreno sottostante (e in falda).

Cos'è? SourceStop è una sospensione acquosa ad alta concentrazione di particelle di **carbone attivo colloidale (CAC)**, sospese in acqua grazie all'uso di polimeri organici.

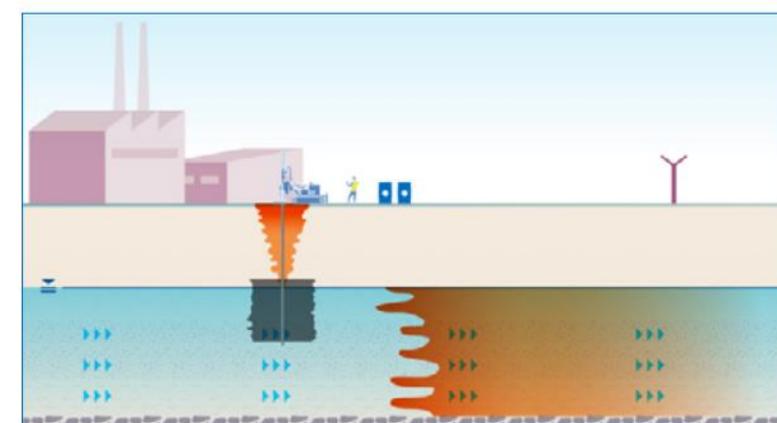
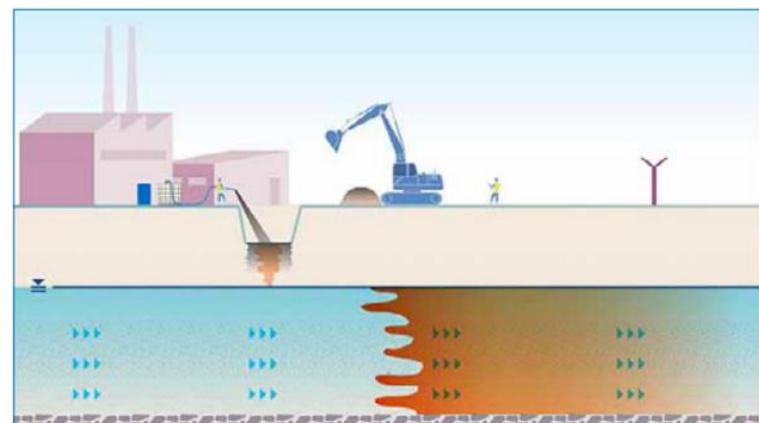
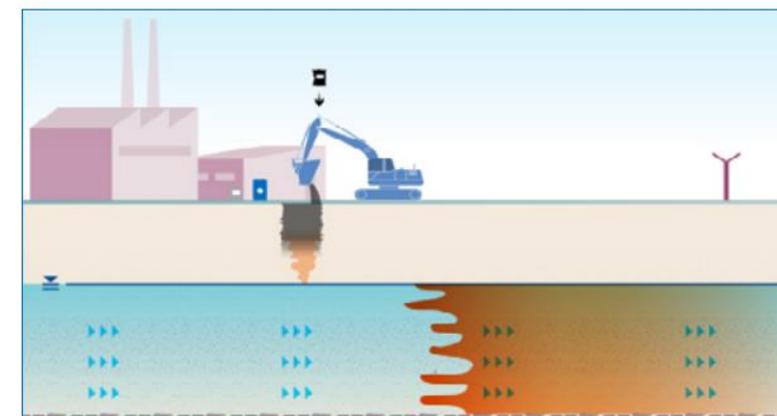
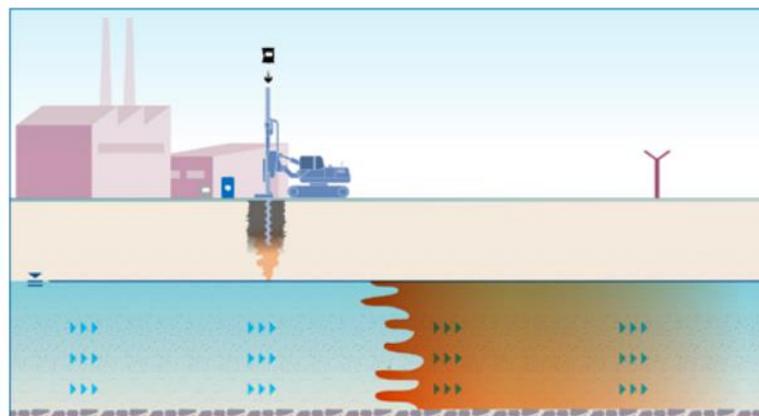
Composizione:

- 65% acqua;
- 35% CAC (1-2 μm);
- 2-4% agenti disperdenti (polimeri organici).



Applicabile in zone sorgente in:

- **Zona insatura;**
- **Frangia capillare;**
- **Sorgenti in falda.**

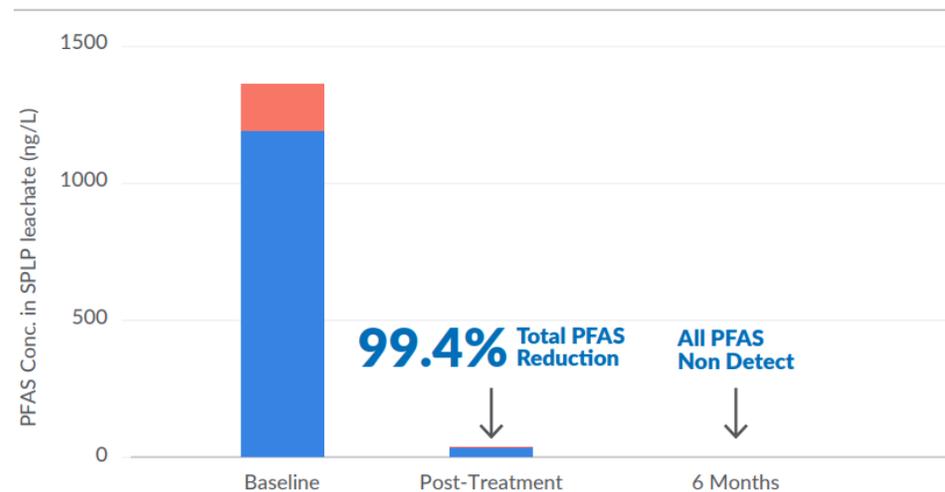


IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU – Carbone attivo colloidale (CAC)

SourceStop™: caso studio su applicazione pilota (ca. 25 m², 75 m³, 3 m profondità)



Site 1 Average PFOS/PFAS in Soil Leachate

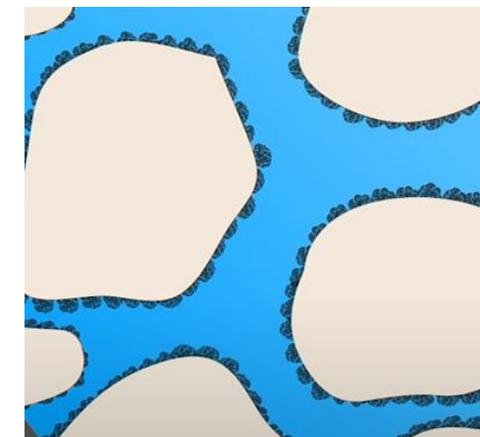
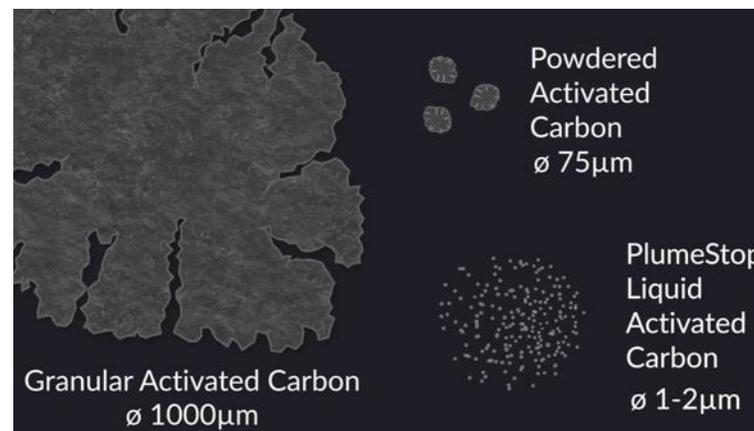
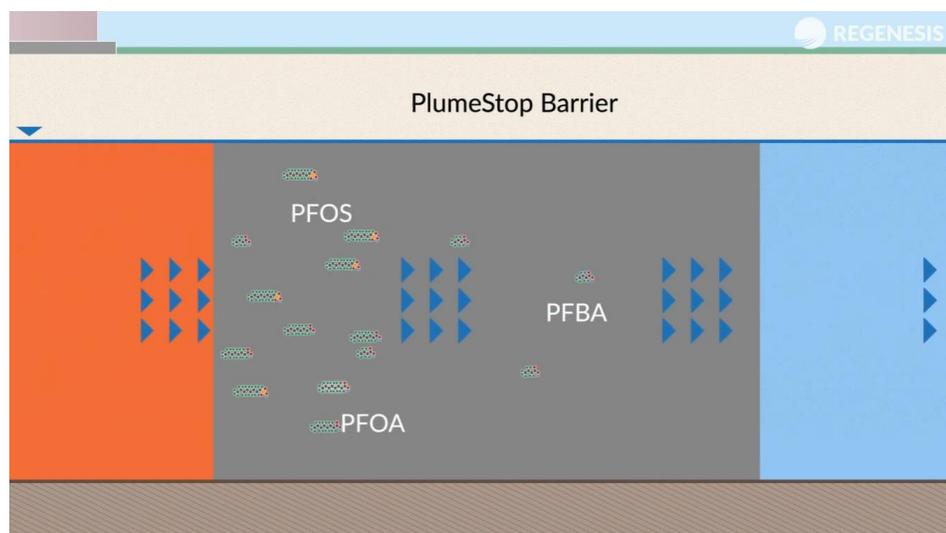
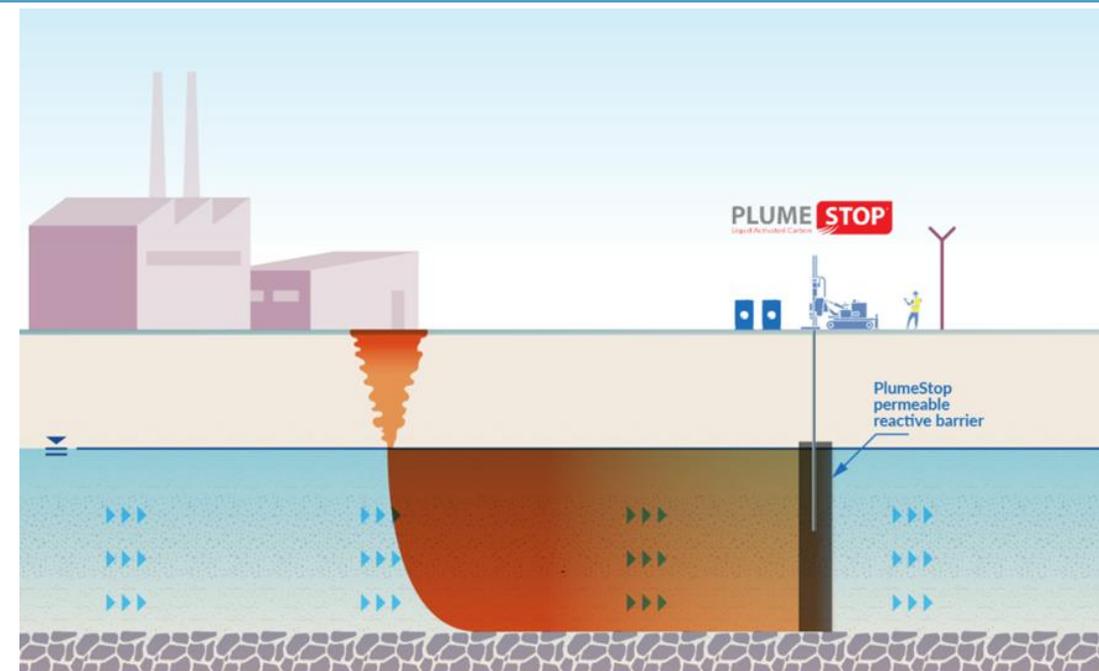


IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU – Carbone attivo colloidale (CAC)

PlumeStop™ Liquid Activated Carbon

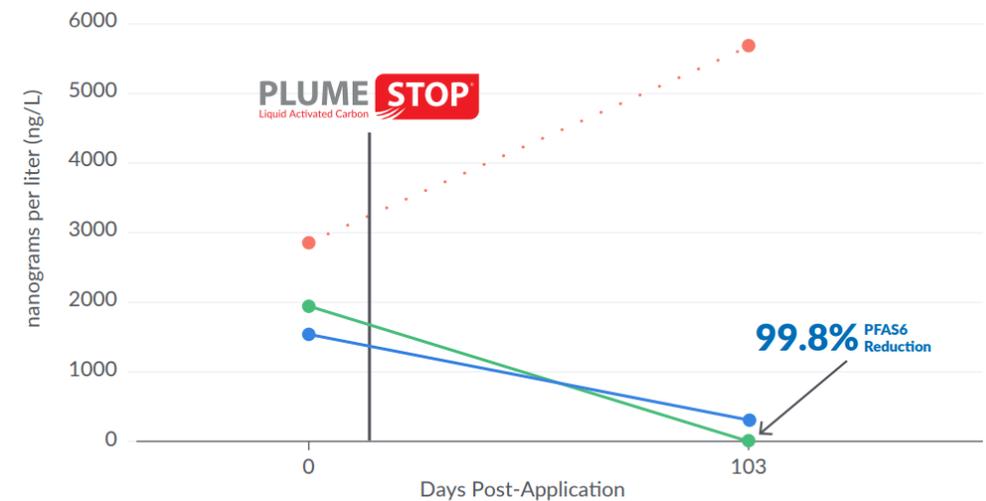
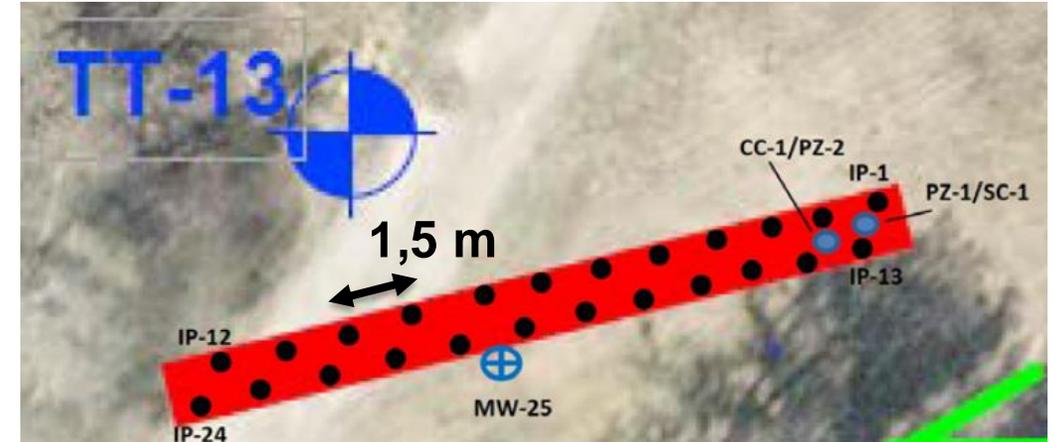
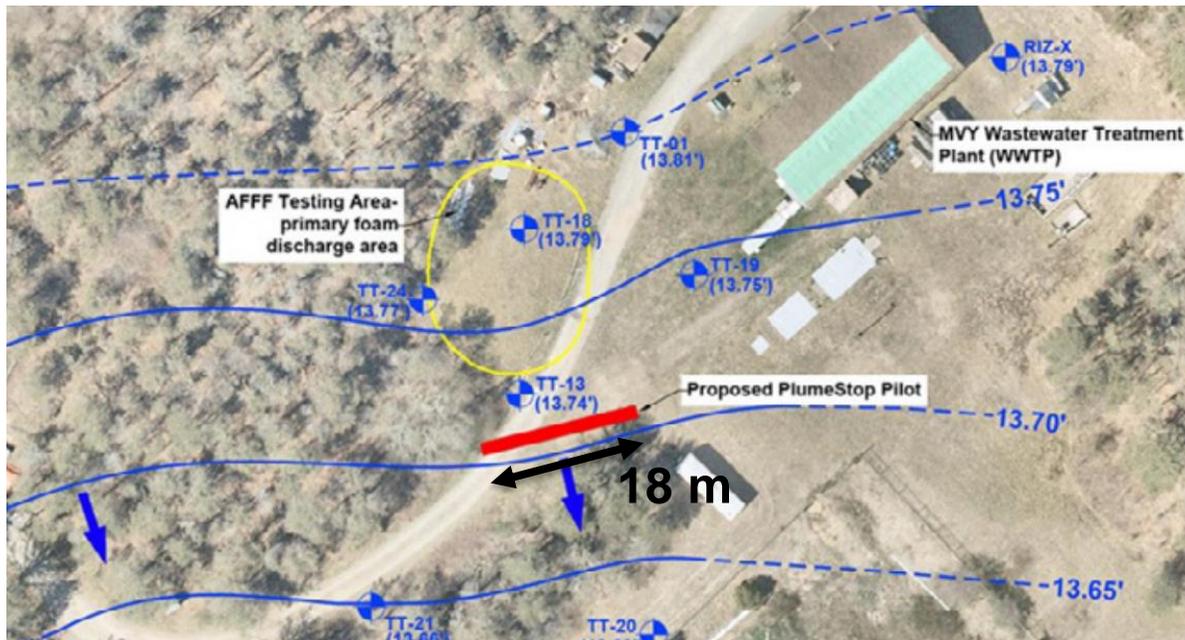
Obiettivo: iniettato a bassa pressione in acquifero, riveste di un sottilissimo strato di CAC le particelle dello strato, formando una barriera permeabile (PRB) adsorbente che elimina il propagarsi del plume off-site, proteggendo i recettori di valle.

Composizione: simile a SourceStop, meno concentrato (~20% CAC), più disperdente per ridurre la necessità di punti di iniezione.



IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU – Carbone attivo colloidale (CAC)

PlumeStop™: caso studio

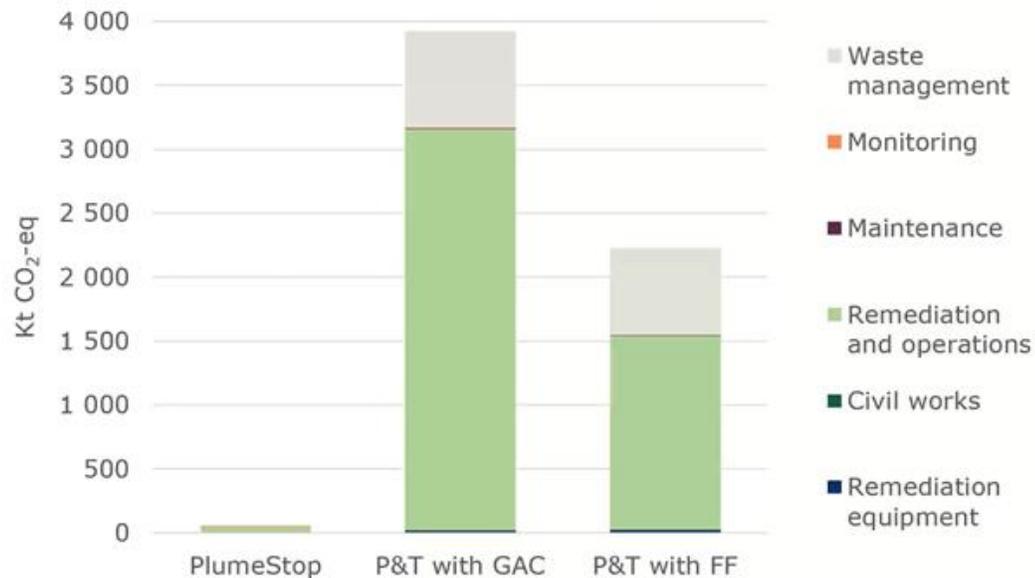


IMMOBILIZZAZIONE IN-SITU – Carbone attivo colloidale (CAC)

PlumeStop™: sostenibilità ambientale ed economica

Calculated project carbon footprint

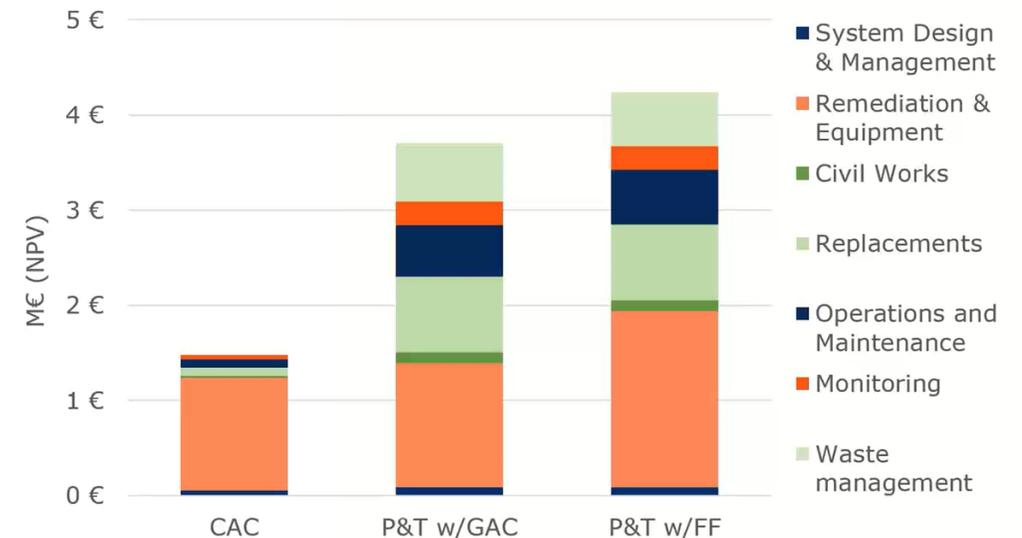
Metric tonnes (kt) CO₂-eq. / 15 years operation



Impronta di carbonio sul ciclo di vita

Project life cycle costs breakdown

Net Present Value, EUR / 15 years operation



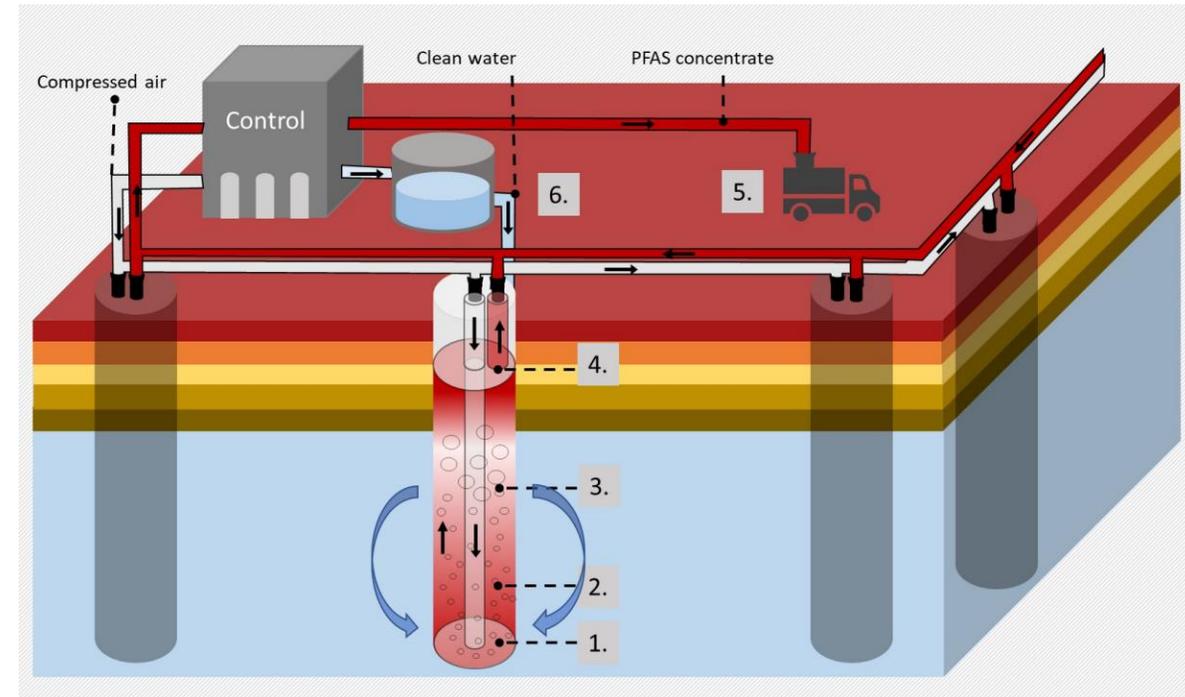
Costi sul ciclo di vita

FRAZIONAMENTO DELLA SCHIUMA IN-SITU (FF)

Obiettivo: PFAS rimossi mediante schiumatura in pozzi in falda appositamente progettati. Difatti molti PFAS sono tensioattivi e hanno una tendenza naturale a schiumare e ad accumularsi all'interfaccia gas-acqua.

Come?

- L'aria compressa viene iniettata attraverso un diffusore sul fondo del pozzo. La colonna di bolle ascendente agisce come una gigantesca pompa e genera un flusso ascendente di acqua di falda, creando un flusso di acqua sotterranea a circolazione radiale nell'acquifero.
- L'ampia superficie delle interfacce delle bolle fornisce una forte superficie di attrazione per i PFAS disciolti. I PFAS vengono così trasportati nella parte superiore della colonna d'acqua.
- La schiuma che si forma alla testa del pozzo è altamente arricchita in PFAS e co-contaminanti e, prima di collassare nuovamente, può essere raccolta e scaricata in un serbatoio di raccolta centralizzato
- La schiuma di PFAS viene concentrata in ulteriori fasi del processo fino a quando rimane solo un iperconcentrato di PFAS da smaltire.
- L'acqua purificata viene pompata nuovamente in falda.



Fonte: OpecSystems

FRAZIONAMENTO DELLA SCHIUMA IN-SITU (FF)



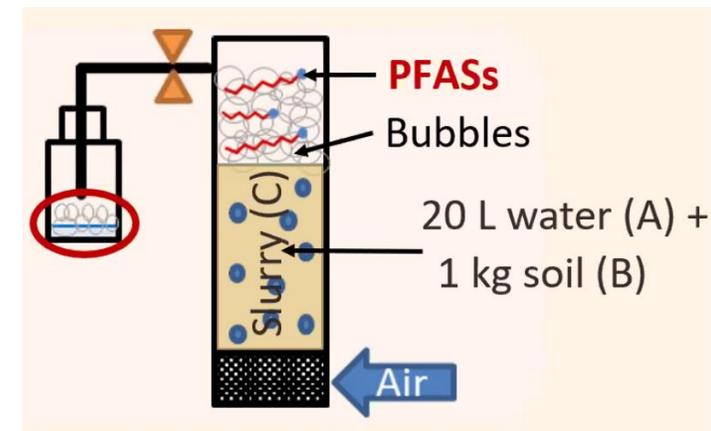
✓ Potenzialmente interessante per il risanamento della zona satura: la medesima tecnologia è già oggi applicata a scala pilota per il trattamento di acque di lavaggio/reflue/falda contenenti PFAS con buoni risultati.

✗ Sviluppato solo a livello concettuale

✗ Efficacia della circolazione delle acque sotterranee (cortocircuito)?

✗ Raggio di influenza raggiungibile?

✗ Efficacia della testa di estrazione della schiuma e reimmissione acqua purificata?



Schema di funzionamento e immagini di schiume di PFAS frazionate da acque/fanghi.

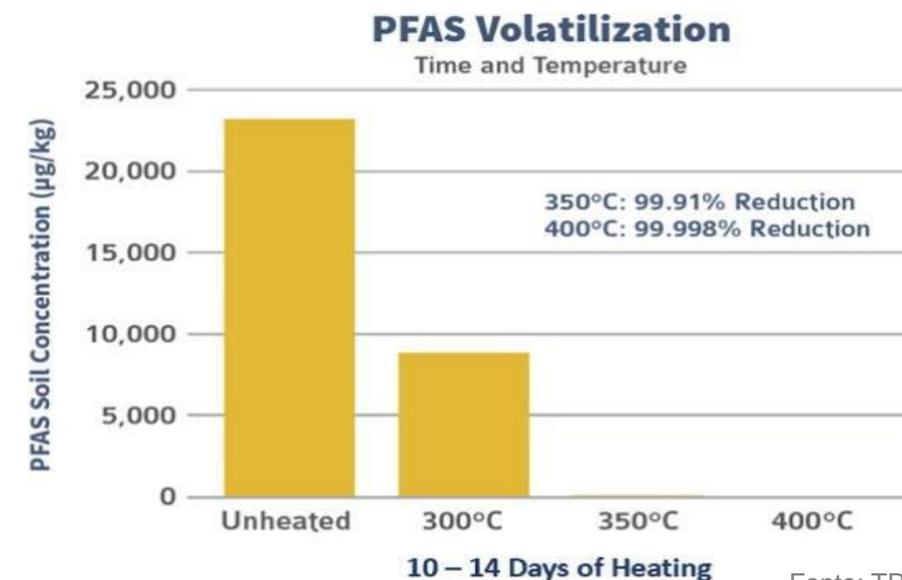
DESORBIMENTO TERMICO IN-SITU

FlexHeater® TCH service

Obiettivo: volatilizzare i PFAS mediante riscaldatori nel terreno (TCH) e aspirare i vapori tramite un sistema di Soil Vapor Extraction (SVE), successivamente trattarli.

Come? TCH + SVE + trattamento vapori (GAC, scrubber...)

- + PFSA richiedono temperature maggiori dei PFCA.
- + Efficace
- + ✗ Trattamento vapori difficoltoso (GAC/combustore + condensa)
- + ✗ Costoso

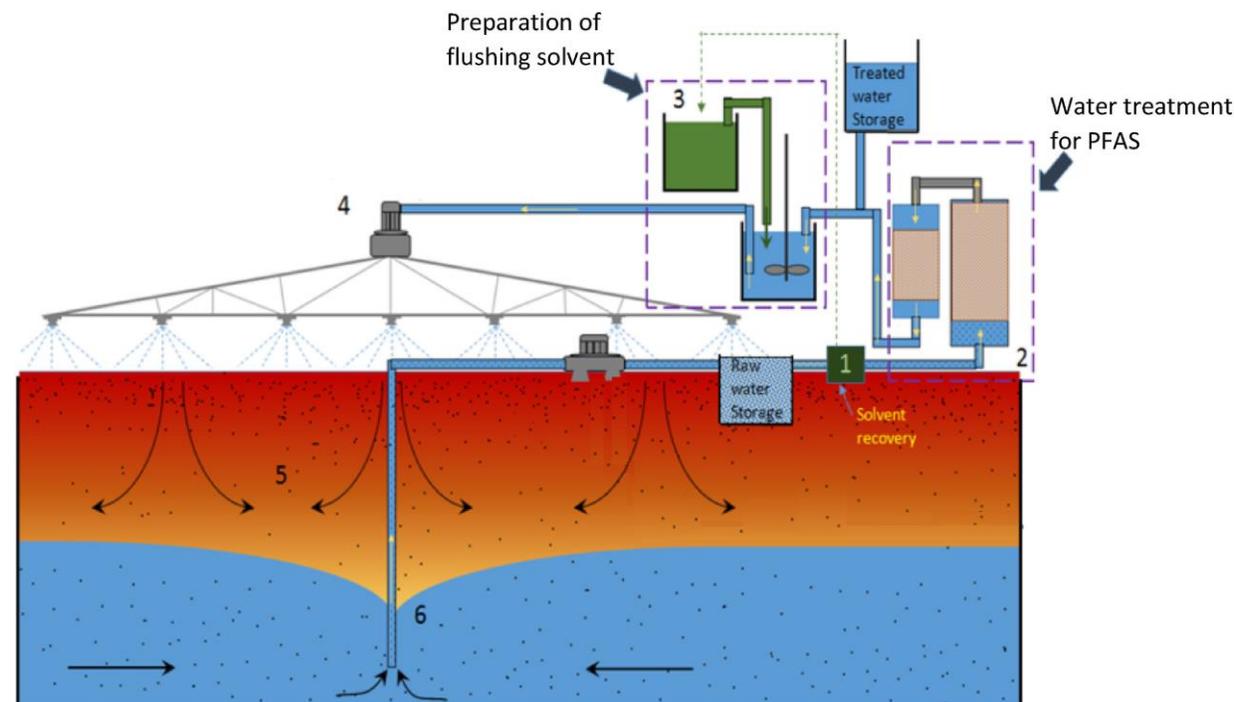


SOIL FLUSHING IN-SITU

Lavaggio in-situ/Eluizione in-situ

Concetto: irrigazione attiva e intensiva della superficie del terreno nella zona sorgente, in modo da aumentare di molte volte l'eluizione naturale (dovuta all'infiltrazione delle precipitazioni) e far defluire il più rapidamente possibile i PFAS in falda. Qui l'acqua di falda è poi raccolta e trattata dall'impianto di Pump&Treat (o anche da una PRB adsorbente) e una parte dell'acqua estratta viene riutilizzata per irrigare il terreno

- + Possibile aggiunta additivi all'acqua di irrigazione (tensioattivi, solventi (es. etanolo), H_2O_2 , acidi/basi...) ma ulteriori studi necessari.
- + Il successo del processo dipende principalmente dal contenuto di carbonio organico del terreno non contaminato e dal tipo di contaminazione.
- + Può aver senso se sistema di Pump&Treat già installato (caso comune).
- + Si potrebbe valutare un trattamento dell'insaturo con Soil Flushing nel caso di PFAS a catena corta e bloccarli in acquifero poi nella PRB.
- + Incertezze soprattutto nell'intervallo delle basse concentrazioni (alla fine della bonifica, dopo un'iniziale rapida diminuzione esponenziale delle concentrazioni di PFAS).
- + Se la contaminazione è costituita principalmente da PFAS a catena più lunga, è probabile che la lisciviazione sia meno efficiente
- + E' davvero desiderabile trasportare della contaminazione ulteriore in falda?
- + Non è ancora stato applicato su scala tecnica per PFAS in nessun sito.

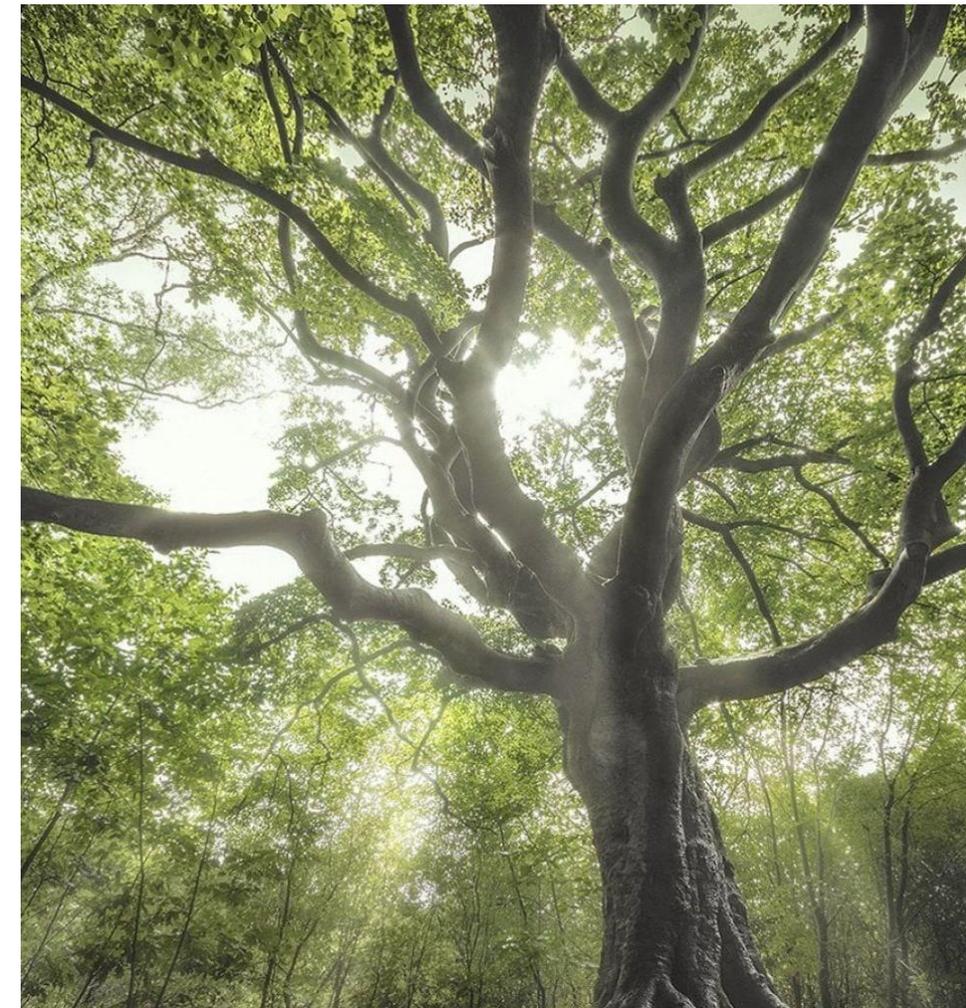


FITORISANAMENTO

Fitoestrazione

Obiettivo: si utilizzano piante che assorbono maggiormente i contaminanti dal suolo e li accumulano in alte concentrazioni nella loro biomassa (i cosiddetti iperaccumulatori). I contaminanti possono essere immagazzinati sia nelle radici sia nella massa biologica fuori terra. Queste parti della pianta vengono quindi rimosse dopo il periodo di vegetazione (raccolta) e vengono avviate a uno smaltimento appropriato (ad esempio, incenerimento).

- + Il fitorisanamento non avrà probabilmente un ruolo importante nella bonifica dei terreni contaminati da PFAS: **i tassi di accumulo sono troppo bassi, per cui la procedura richiederebbe molti anni.**
- + Durante questo periodo, i PFAS vengono continuamente trasportati con le precipitazioni negli strati più profondi del suolo e nelle acque sotterranee, per cui il fitorisanamento non comporta un vantaggio sostanziale
- + Si pone anche la questione dell'utilizzo termico delle piante che arricchiscono i PFAS. In questo caso, bisognerebbe ancora chiarire se le piante possono essere alimentate in processi tecnici ed energetici che avvengono a temperature così elevate da distruggere i PFAS. Questo non è il caso della maggior parte dei processi.



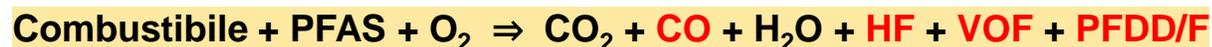
SMOLDERING

Combustione in-situ (o anche ex-situ)

Obiettivo: i PFAS vengono distrutti termicamente direttamente nel terreno in presenza di un combustibile e un apporto limitato di ossigeno.

Smoldering = processo di combustione senza fiamma entro una matrice porosa (ardere, fumare)

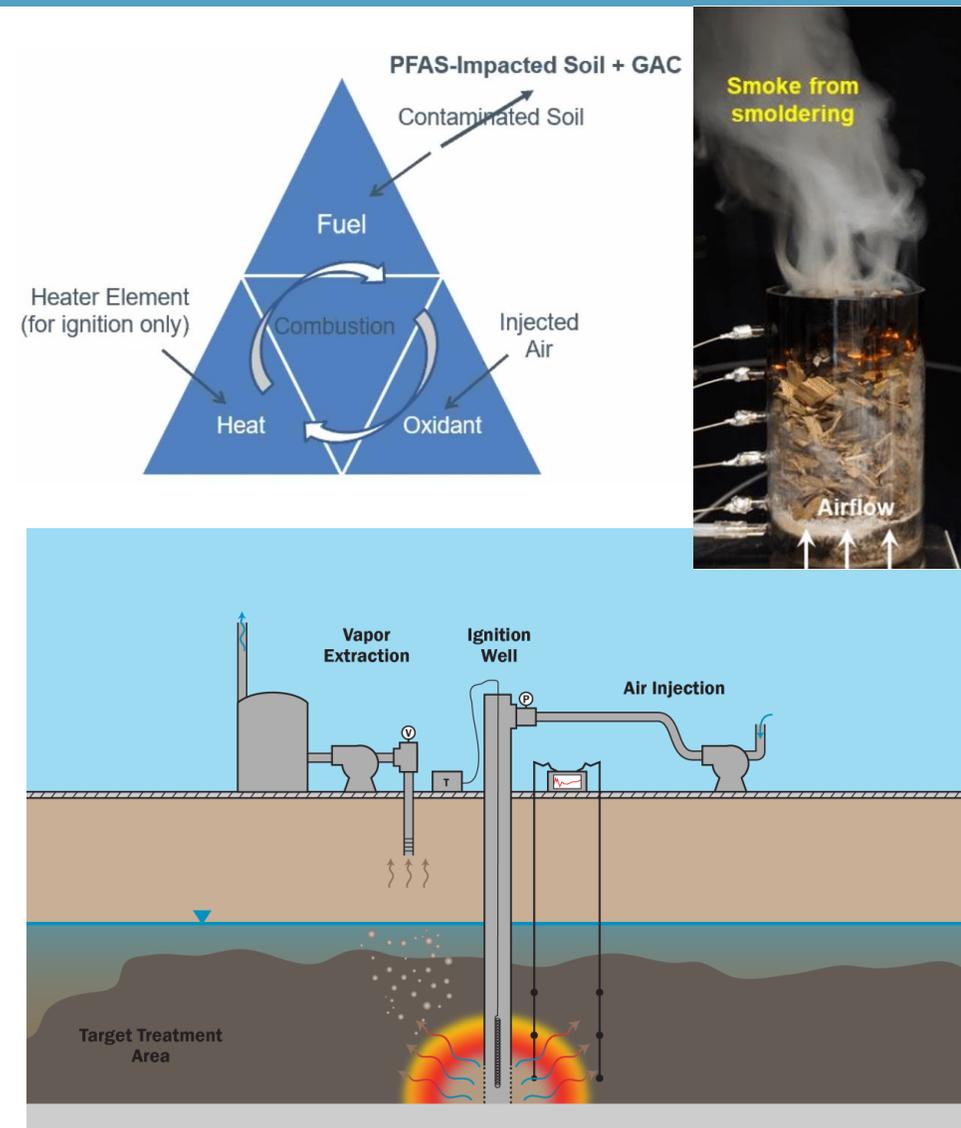
Utilizzato con discreto successo nei casi di contaminanti idrocarburici (diesel) in fase liquida non acquosa (NAPL), dove gli idrocarburi stessi sono il combustibile.



VOF = fluoro organico volatile (ad es. PFAS a catena corta)

PFDD/F = diossine/furani fluorurati

- + Il combustibile ideale (i PFAS non sono smolderable) è un prodotto di scarto che deve essere smaltito (ad esempio GAC esausto: $35\text{-}50 \text{ g}_{\text{GAC}}/\text{kg}_{\text{suolo}}$ generano oltre $900 \text{ }^\circ\text{C}$).
- + A tal fine, il combustibile dovrebbe essere iniettato nel sottosuolo oppure mediante miscelazione del suolo in situ
- + Il fronte caldo si diffonde dal punto di accensione attraverso la matrice contaminata in direzione del flusso d'aria



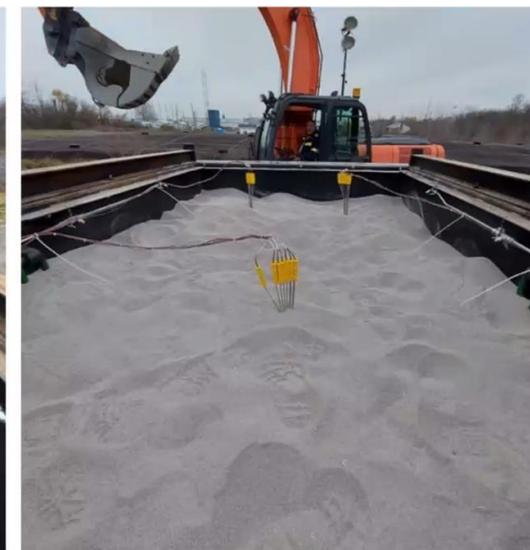
SMOLDERING

Combustione in-situ (o anche ex-situ)

- + ✗ Ancora mai applicato in situ per i PFAS
- + ✗ Costoso e difficile trattamento dei gas prodotti (SVE)
- + L'aggiunta di calce (CaO) al suolo può ridurre la formazione di HF e VOF mineralizzando il fluoro come minerale di calcio (CaF₂)



Esperimento su scala pilota di smoldering ex-situ.
Fonte: SavronSolutions



Grazie per l'attenzione

Eugenio Ciabattoni, Simona Piubellini, Siria Silini

