



intersol'2023
 Congrès-Exposition International sur les Sols, les Sédiments et l'Eau
 International Conference-Exhibition on Soils, Sediments and Water



ZÜBLIN
 WORK ON PROGRESS

*) PFAS ou PFC ou PFT:
 substances alkylées per- et polyfluorées

Procédés de nettoyage pour les fluides chargés en PFAS*)

Michael Linke,
 Hans-Georg Edel, Nicolas Etard

Züblin Umwelttechnik GmbH
 Allemagne · France · Suisse · Italie
www.zueblin-umwelttechnik.com

© Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

1

Contenu

- Introduction
- Secteur eau : Procédés - Technique - Coûts
- Lavage des sols : Procédés - Technique - Coûts
- Résumé

2 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
 WORK ON PROGRESS

2

Installations de traitement de PFAS de Züblin Umwelttechnik (résumé)

Année	Projet	Fluid	Procédé	Débit
depuis 2023	Région de Düsseldorf, indus. chim.	Eaux souterraines	FS*, CA*	150 m³/h
depuis 2022	Allemagne du Nord, lavage de sol	Sol, eau de process	Prétraitement, CA	200 m³/h
depuis 2022	Berlin, usine de production d'eau	Eaux souterraines	FS, CA	150 m³/h
depuis 2022	Rheinmünster, agriculture	Eaux souterraines pour l'irrigation	CA	2 m³/h
depuis 2022	BY, essai pilote/concept	Lixiviat	Prétraitement, CA	0,15 m³/h
depuis 2022	Cobourg, essai pilote/concept	Lixiviat	Prétraitement, CA	1 m³/h
depuis 2022	CH-Monthey, industrie chimique	Eaux souterraines	CA	50 m³/h
depuis 2022	Aéroport de Brême	Eaux souterraines	FS, CA	14 m³/h
depuis 2021	Röthenbach, Industrie	Eaux souterraines	CA	50 m³/h
depuis 2021	Sinzheim, stade	Eaux souterraines pour l'irrigation	CA	8 m³/h
depuis 2020	I-Spinetta, industrie chimique.	Eaux souterraines	CA	40 m³/h
depuis 2020	Nuremberg, aéroport	Eaux souterraines	CA	25 m³/h
depuis 2020	BW, constructeur automobile	Eaux souterraines	CA	30 m³/h
2019 - 2021	Baden-Baden, R+D Agriculture	Eaux souterraines pour l'irrigation	CA	12 m³/h
2018 - 2021	Ingolstadt, lavage de sol	Sol, eau de process	Prétraitement, CA	380 m³/h
depuis 2018	Ingolstadt, sécurité en aval	Eaux souterraines	FS, CA	210 m³/h
depuis 2016	Stuttgart, aéroport	Eaux souterraines	CA	5 m³/h
depuis 2015	Rastatt, tunnel sud	Eau de construction	Prétraitement, CA	200 m³/h
2015	Francfort, aéroport	Eau d'extinction	CA	1 m³/h
depuis 2014	NRW, industrie chimique	Eaux souterraines	CA	70 m³/h
depuis 2013	Basse-Saxe, industrie chimique	Eaux souterraines	CA	5 m³/h
depuis 2010	NRW, industrie chimique	Eaux souterraines	CA	50 m³/h
depuis 2010	NRW, industrie chimique	Eaux souterraines	CA, 3 lignes de trait.	360 m³/h

*FS : filtre à sable / CA : charbon actif eau

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

3 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

3

Procédés de nettoyage pertinents pour les fluides chargés en PFAS



Secteur eaux

Eau souterraine, lixiviat, eau de process, eau d'irrigation

- Adsorption sur charbon actif
- Échangeur d'ions
- Filtration sur membrane

Secteur sol

Sols sablonneux, graveleux, limoneux, argileux

- Lavage du sol
- Nettoyage thermique des sols

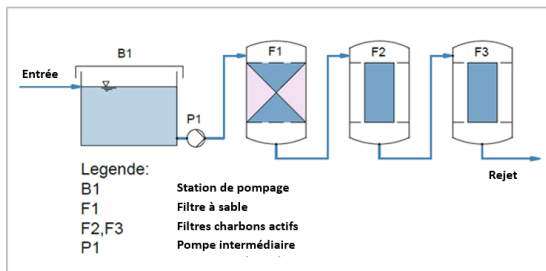
Accident de wagon-citerne
17 février 2002, Osnabrück (DE)
Source : Geo-Data

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

4 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

4

Secteur eau – Traitement par charbon actif



- Filtre à sable (en général)
- Filtre charbon actif (par paliers)
→ Filtre primaire/ filtre police
- Charbon actif en grains
PFAS optima®
- Charge en PFAS 0,1 - 0,01 % en poids
- Concurrence pour l'adsorption sur grain
COD (ppm) >>> PFAS (ppb)
- Pas d'ajout de produits chimiques
- Qualité du filtrat :
< 1 ng/l (!) possible par composé individuel
- Le charbon actif chargé **peut être réactivé**
→ pas d'élimination, mais recyclage

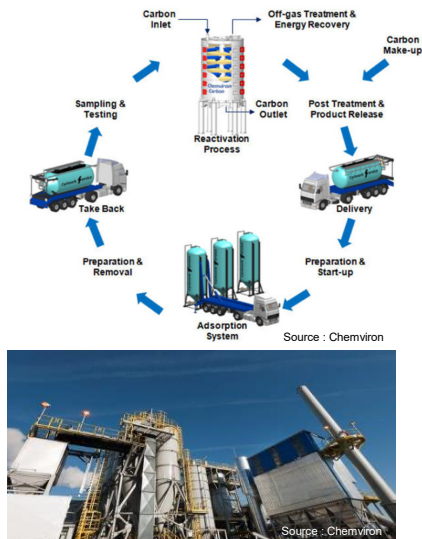
5 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

5

Secteur eau - Réactivation des charbons actifs

The Reactivation Cycle



Processus de réactivation

- Séchage au four à environ 120 °C :
l'eau, les polluants à bas point d'ébullition s'évaporent
- Chauffage dans le four à plus de 450 °C :
désorption des polluants volatils
- Poursuite du chauffage à plus de 600 °C :
Pyrolyse de polluants organiques à point d'ébullition élevé - Incinération partielle
- Epuration des fumées par post-combustion thermique à plus de 1200 °C
- Lavage des fumées pour éliminer les gaz acides tels que HCl, HF

Installations de réactivation du charbon actif

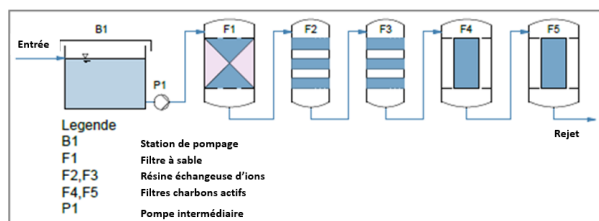
- Autorisation selon la loi allemande (BImSchV)

6 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

6

Secteur eau - Traitement par échangeur d'ions



- Prétraitement par filtre
- Echangeur d'ions à deux niveaux
- En général filtre CA pour post-traitement
- Concurrence pour la fixation sur résine
 - Anions (ppm) >>> PFAS (ppb)
 - COD (ppm) >>> PFAS (ppb)
- Résine
 - Élimination en incinération (HT)

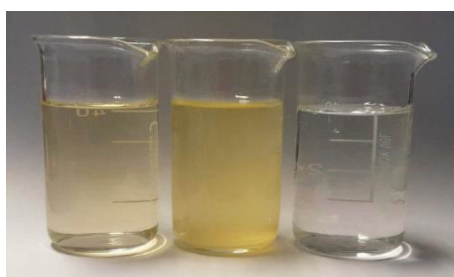
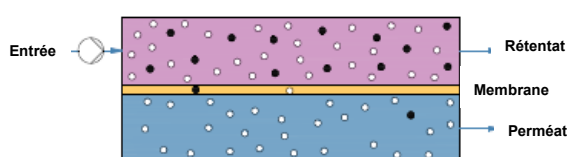
→ Echangeur d'ions uniquement pertinent pour prétraitement, en général, traitement ultérieur nécessaire

7 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

7

Secteur eau – Traitement par filtration sur membrane



Lixiviât Rétentat Perméat

- Techniquement complexe (NF, RO)
- Coûts d'investissement / d'exploitation élevés
- Prétraitement / préfiltration
- Alimentation (100%)
Perméat (80-85%) + rétentat (env. 15-20%)
- Rétentat contenant les PFAS
→ Traitement par adsorption sur charbon actif
- Qualité du perméat :
< 10 ng/l par composé individuel possible

→ Le traitement des PFAS est que pertinent avec une installation à membrane déjà existante

8 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

8

Secteur eau - Prétraitement

- Substances indésirables:
 - COD
 - Polluants supplémentaires (BTEX, HC,...)
 - Fe^{2+} , Mn^{2+}
 - Dureté de l'eau
 - Matières solides
 - Teneur en sel
- Prétraitement nécessaire
 - Élimination des substances indésirables
- Boues de traitement
 - Traitement des boues
 - Coûts d'élimination élevés



9 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

9

Secteur eau - Installations de traitement de PFAS (sélection)



Installation mobile, eau de chantier (Bavière), 10 m³/h



Ancienne raffinerie, barrière hydraulique (Ingolstadt), 210 m³/h



Aéroport, eau souterraine (Stuttgart), 5 m³/h



Aéroport, eau d'extinction collectée (Francfort), 1 m³/h



Irrigation, eau souterraine (Vallée du Rhin), 12 m³/h



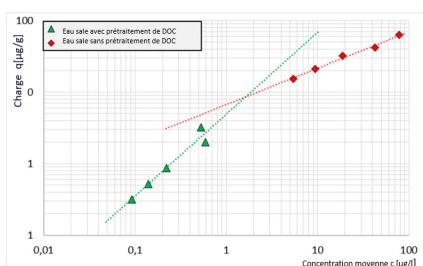
Zone naturelle protégée, eaux souterraines (Berlin), 150 m³/h

10 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

10

Essai en laboratoire et installation expérimentale



Essai en laboratoire

- Détermination d'isothermes d'adsorption avec des eaux brutes
- Désorption thermique de sols jusqu'à 650°C

Installation expérimentale

- Vérification des résultats de labo et dimensionnement d'installation fixe
- Traitement de PFAS avec différents médias d'adsorption :
max. 6 médias en parallèle ou en série
- Jusqu'à 150 l/h
- Surveillance à distance (débit, pression)

11 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

11

Secteur eau - Comparaison des coûts, modèle de calcul

Cas théorique d'assainissement

- Débit : $Q_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$
- Σ PFAS, entrée : $c = 1 - 10 - 50 - 100 \text{ µg/L}$
- Σ Charge de PFAS : $c = 0,2 - 2 - 10 - 20 \text{ kg/a}$
- Substances indésirables : aucune
- Procédés :
- Adsorption sur charbon actif, échangeur d'ions, floculation, filtration sur membrane

Les coûts totaux incluent

- Location
- Entretien des installations y compris maintenance et surveillance
- L'énergie électrique
- Les moyens d'exploitation y compris la réactivation ou l'élimination des médias



Station d'épuration des eaux souterraines PFAS, Vallée du Rhin

12 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

12

Comparaison des coûts : $Q_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Sigma \text{PFAS} = 10 \text{ }\mu\text{g/l}$, charge 2 kg/a

Mise à jour : août 2022

Procédures de nettoyage	Adsorption sur charbon actif	Échange d'ions	Floculation	Filtration à membrane
Coûts uniques - Montage - Mise en service	30.000 €	35.000 €	41.000 €	59.000 €
Ressources	0,39 €/m ³	0,44 €/m ³	0,49 €/m ³	1,12 €/m ³
Coût total spécifique *	0,92 €/m ³	1,17 €/m ³	1,31 €/m ³	3,42 €/m ³

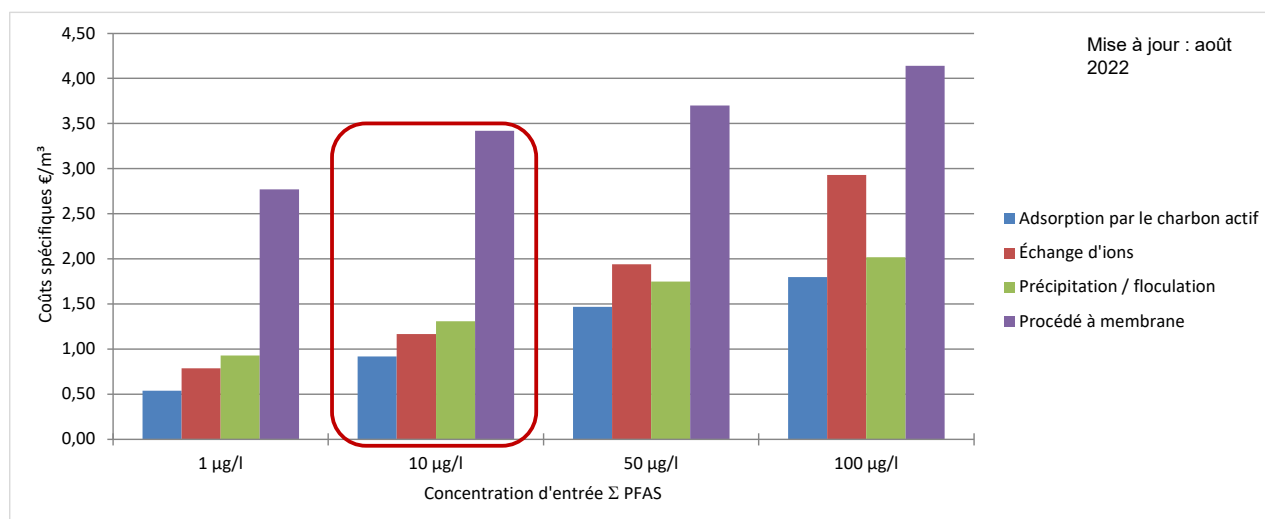
- Location et entretien des installations
- Energie électrique, moyens d'exploitation, y compris réactivation ou élimination

13 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

13

Coûts spécifiques : $Q_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Sigma \text{PFAS} = 1-100 \text{ }\mu\text{g/l}$, charge 0,2-20 kg/a



14 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

14

Lavage des sols - Installation en Bavière (D)



■ Lavage des sols (04/18 - 11/21)

Type de polluant	Masse [to]
PFAS	154.481
HCT	276.197
PFAS + HCT	430.678

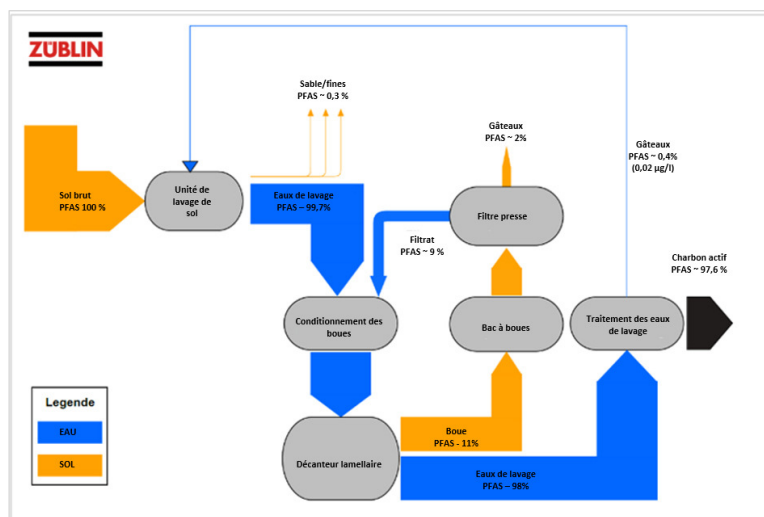
- **Site**
Ancienne raffinerie, Ingolstadt
- **Exploitation** (ARGE Sanierung IN-Campus GbR)
- Autorisation selon la loi allemande (BImSchV)
- **Types de polluants**
- PFAS, HC (C5-C9), HC (C10-C40), (BTEX)
- **Flux de processus**
- 1.200 t/d de matières solides à l'entrée
- jusqu'à max. 10 % de boues
- **Traitement de l'eau de process (boueuse)**
- Flocculation / Sédimentation / Filtration à sable
- Traitement des boues sur filtre presse
- Adsorption sur charbon actif
→ **Recyclage de l'eau / Circuit fermé (380 m³/h)**
- **Sol nettoyé**
→ **Remise en place sur le site**
- **Coûts du lavage de sol (total)**
→ **Environ 50 EUR/t de sol lavé**

15 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

15

Diagramme de flux des PFAS - Station de lavage des sols à Ingolstadt



16 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

16

Lavage des sols - Installation au nord de l'Allemagne



- **Lavage du sol**
 - sol sablonneux avec une fraction fines
 - technologie adaptée
 - parties fines contenant des PFAS en partie également lavables
 - Masse : env. 800.000 t
- **Site**
 - Aérodrome, nord de l'Allemagne depuis 09/2022
- **Type de polluant**
 - PFAS (HAP, HCT subordonnés)
- **Flux de processus**
 - env. 2.000 t/d de matières solides à l'entrée
 - installation de lavage de sol à deux lignes
- **Traitement de l'eau de process (boueuse)**
 - Flocculation / Sédimentation / Filtration à sable
 - Traitement des boues filtre presse
 - Adsorption par charbon actif
 - Recyclage de l'eau / Circuit fermé (200 m³/h)
- **Sol nettoyé**
 - Remise en place sur le site
- **Coûts du lavage de sol (à présent)**
 - Environ 50-60 EUR/t de sol lavé

17 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

17

Résumé

Secteur eau

- Concentrations de PFAS : en général 1-10 µg/L
- Adsorption sur charbon actif, éventuellement échangeur d'ions ou filtration sur membrane
- Tenir compte des substances indésirables
- Filtrat : en général 1-10 ng/l par composé individuel
- Coût spécifique : 0,54 - 1,30 €/m³

Lavage des sols

- Sols sablo-graveleux, aussi teneur en fines
- Les fines contenant des PFAS sont en partie lavables
- Traitement des boues / de l'eau essentiel

Facteurs de réussite

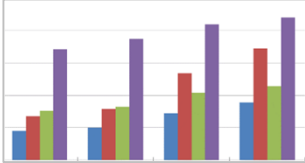
- enquête
- le cas échéant, essais sur le terrain
- savoir-faire
- expérience
- offre ferme et définitive

18 © Züblin Umwelttechnik GmbH, 29. Mars 2023

ZÜBLIN
WORK ON PROGRESS

18

Des questions ?



Dr. Michael Linke
Tél. +49 7145 9324-208
Mail: michael.linke@zueblin.de

Nicolas Etard
Tél. +33 6 35 83 78 51
Mail: nicolas.etard@zueblin.de

Züblin Umwelttechnik GmbH
Agence de Strasbourg
6, rue Gutenberg - BP 197
F-67725 Hoerdt Cedex
Tel. +33(0)3 88 68 79 91
www.zueblin-umwelttechnik.com/fr

