



Assainissement des eaux souterraines polluées par les PFAS : analyse coûts-techniques et étude de cas IN-Campus

Hans-Georg Edel

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

© DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

1^{er} Symposium Sites pollués Suisse 12 novembre 2019, Soleure



ZÜBLIN
 TEAMS WORK.

Procédés d'assainissement et d'épuration des eaux souterraines polluées par des PFC



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

Procédés d'assainissement

- Pump-and-treat
- **Pas applicables :**
 Procédés d'assainissement in situ
 biologiques, chimiques, thermiques

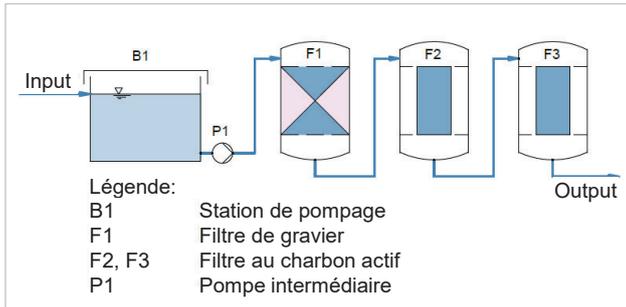
Procédés d'épuration

- Adsorption sur charbon actif
- Échange d'ions
- Floculation
- Procédés à membranes

2 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
 TEAMS WORK.

Installation au charbon actif



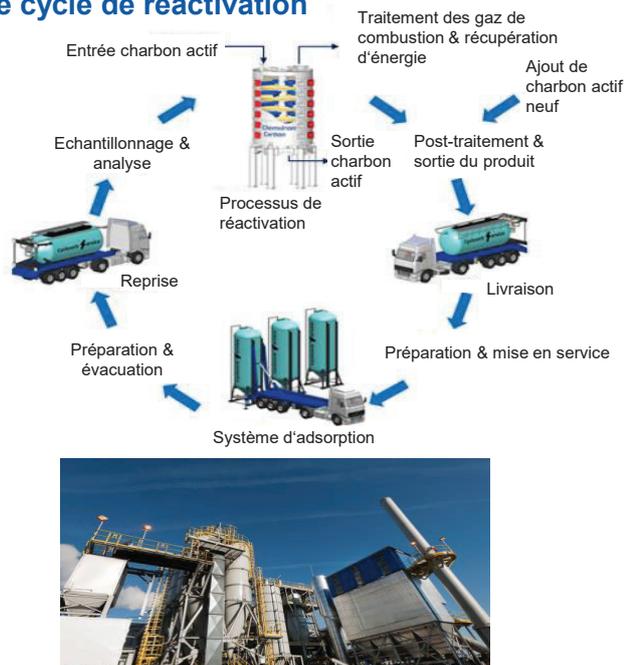
- Filtre de gravier (en gén.)
- Filtre à eau au charbon actif, deux étapes (plusieurs étapes)
→ Filtre de travail / filtre de sécurité
- Charbon actif en grains (types spéc. pour les PFC)
- Charge PFC 0,1 - 0,01 % en poids
- Concurrence pour les sites d'adsorption disponibles
COD (ppm) >>> PFC (ppb)
- Pas d'ajout de produits chimiques
- Qualité du filtrat :
Possible d'arriver à < 10 ng/l par composé individuel
- Le charbon actif chargé dans l'installation est **réactivable**
→ pas d'élimination, mais recyclage

3 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Réactivation du charbon actif de l'installation

Le cycle de réactivation



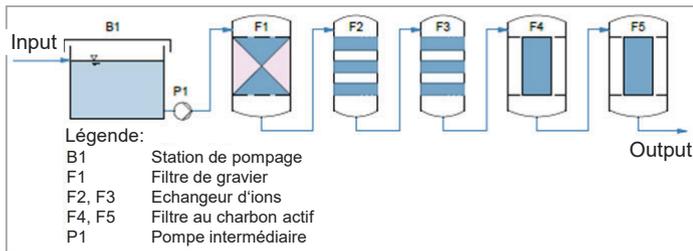
Processus de réactivation

- Séchage au four à env. 120°C :
l'eau et les polluants à bas point d'ébullition s'évaporent
- Chauffage au four jusqu'à plus de 450°C :
désorption des polluants volatils
- Elévation de la température jusqu'à plus de 600°C :
pyrolyse des polluants organiques à point d'ébullition élevé, combustion partielle
- Nettoyage des gaz par post-combustion thermique à plus de 1200°C
- Lavage des gaz pour éliminer les gaz acides comme le HCl ou le HF

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

© DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

Installation d'échange d'ions

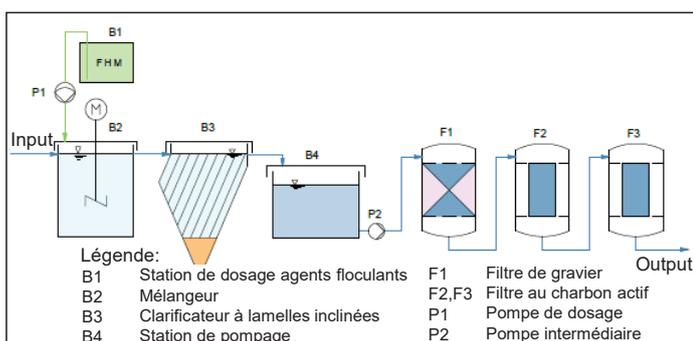


- Filtre de gravier / filtre fin
- Échange d'ions en 2 étapes
- Filtre à eau au charbon actif, deux étapes
- Échangeur d'anions
Résine d'échange d'ions **seulement en partie régénérable**
- Concurrence pour les sites d'échange d'ions
- Anions (ppm) >>> PFC (ppb)
- COD (ppm) >>> PFC (ppb)
- Résine d'échange d'ions
→ **Élimination par combustion HT**
- Adsorption sur charbon actif
→ Régénérat
→ Nettoyage fin

5 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Installation de floculation

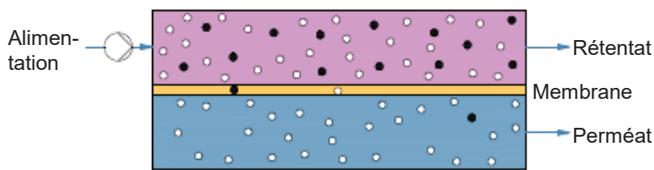


- Floculation → Sédimentation → Filtration
- Filtre à eau au charbon actif, deux étapes
- Charge PFC possible jusqu'à env. 0,2% en poids
- Ajout de produits chimiques (classe de danger 1 pour les eaux)
- Efficacité réduite pour les faibles concentrations (PFC < 20 µg/l)
→ **Élimination par combustion HT**
- Boues claires (4-6% MS)
→ Filtre-pressé à plateaux (30-50% MS)
→ **Élimination par combustion HT**
- Adsorption sur charbon actif pour nettoyage fin

6 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Installation à membranes



- Techniquement complexe
- **Coûts d'investissement et d'exploitation élevés**
- Prétraitement / préfiltration
- Alimentation (100%) → Perméat (80-85%) + rétentat (env. 15-20%)
- Rétentat contaminé par des PFC → Traitement par adsorption sur charbon actif
- Qualité du filtrat : Possibilité d'arriver à **< 10 ng/l** par composé individuel

→ L'élimination des PFC n'a de sens qu'en parallèle avec un traitement de l'eau potable

7 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Prétraitement

- Éléments perturbateurs
 - Fe^{2+} , Mn^{2+}
 - COD
 - dureté de l'eau
 - matières solides
 → Influence sur le traitement de l'eau
- Polluants supplémentaires
- Boues de traitement → coûts d'élimination élevés
- Prétraitement
 - floculation, sédimentation, filtration
 - déferrisation / démanganisation
 - traitement des boues
 - autres étapes de traitement



8 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Installations de la firme Züblin Umwelttechnik pour l'épuration des eaux polluées par des PFC

Projets	Depuis 2009: env. 30 assainissements d'eaux souterraines polluées par des PFC, 1 installation de lavage du sol
Sites	Industrie chimique, industrie pétrolière, aéroports/aérodromes, agriculture
Types de pollution	Pollutions par des PFC seuls, contaminations mixtes incluant des PFC
Types de PFC	PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNoA, PFDeA, entre autres PFBS, PFPeS, PFHxs, PFHps, PFOS, PFDeS, entre autres 6:2 FTS (H4PFOS), 8:2 FTS, entre autres
Éléments perturbateurs	COD, Fe 2+, Mn 2+, dureté de l'eau, matières solides
Débit	1 - 360 m ³ /h
Concentration à l'entrée	Ø 1 - 100, max. 600 µg/l PFC
Valeurs cibles - concentrations à la sortie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Substances isolées < 10 ng/l (!) ▪ Somme des quotients (\sum valeurs mesurées/seuil d'insignifiance pour 13 PFC) < 1,0
Adsorbants	Charbon actif en grains, résine d'échange d'ions
Floculation	Agents floculants spécifiques
Charbon actif	Charbons actifs spéciaux pour les PFC (div. types)
Durée de vie	min. 12 mois
Réactivation	Pas d'élimination, mais réactivation et réutilisation !

Diverses installations de traitement des eaux polluées par des PFC (exemples)



Inst. mobile, eaux de chantier



Industrie chim., eaux souterraines



Aéroport, eaux souterraines



Aéroport, eaux d'extinction



Irrigation, eaux souterraines



Ancienne raffinerie, eaux souterraines

Comparaison des coûts - modèle de calcul

Cas d'assainissement théorique

- Débit : $Q_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$
- Σ PFC à l'entrée : $c = 1 - 10 - 50 - 100 \text{ } \mu\text{g/l}$
- Σ charge en PFC : $c = 0,2 - 2 - 10 - 20 \text{ kg/a}$
- Éléments perturbateurs : aucun
- Procédés : Adsorption sur charbon actif, échange d'ions, floculation, procédé à membranes

Les coûts globaux incluent :

- Technique de l'installation
- Mise à disposition, entretien, réparations, maintenance, surveillance
- Énergie électrique
- Fournitures opérationnelles
y.c. réactivation, élimination

11 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

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

Procédés de traitement	Adsorption sur charbon actif	Échange d'ions	Floculation	Procédé à membranes
Coûts uniques - Montage - Mise en service	26.000 CHF	30.400 CHF	35.800 CHF	51.000 CHF
Fournitures opérationnelles	0,08 CHF/m ³	0,18 CHF/m ³	0,16 CHF/m ³	0,68 CHF/m ³
Fournitures opérationnelles Pourcentage du coût global	14%	22%	18%	34%
Coûts globaux * - spécifiques - annuels	0,54 CHF/m ³ 119.020 CHF/a	0,86 CHF/m ³ 188.050 CHF/a	0,89 CHF/m ³ 195.200 CHF/a	2,03 CHF/m ³ 445.140 CHF/a

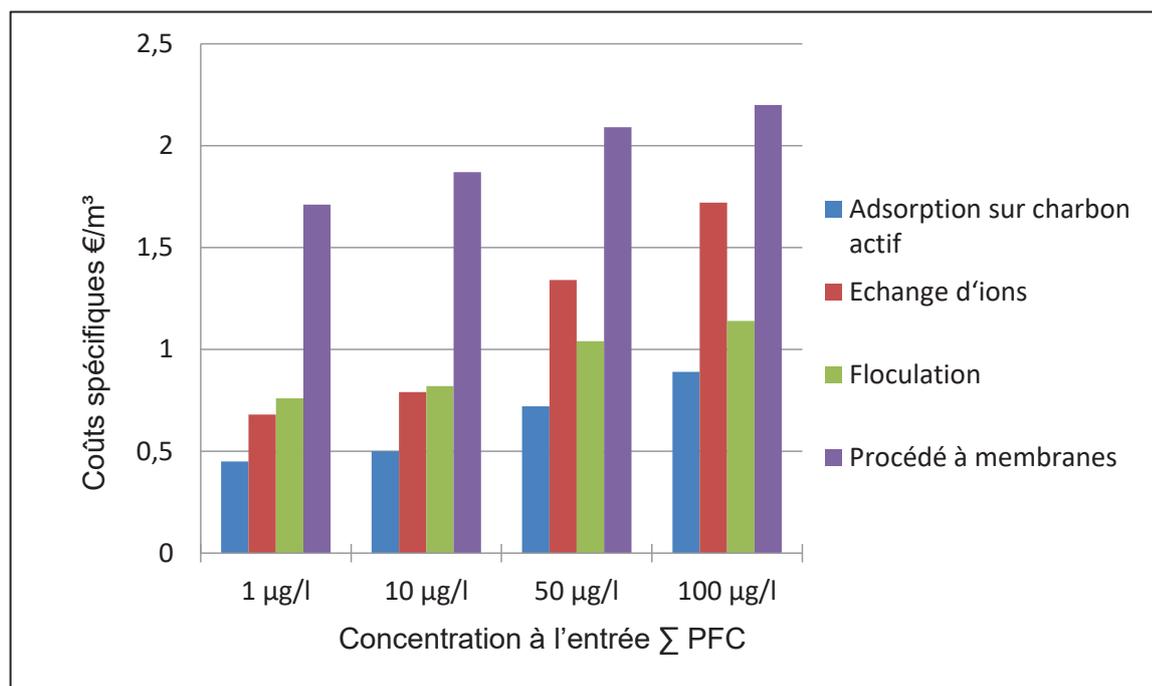
* Technique de l'installation (mise à disposition, entretien, réparations, maintenance, surveillance), énergie électrique, fournitures opérationnelles y.c. réactivation et élimination

1,09 CHF - 1,00 €

12 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

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



13 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Comparaison des méthodes

Méthode	Adsorption sur charbon actif	Échange d'ions	Flocculation	Procédé à membranes
Valeurs cibles à la sortie : PFC < 10 ng/l	oui	non	non	oui
Post-nettoyage	aucun	nécessaire	nécessaire	nécessaire
Déchets	aucun	regénérat, résine d'échange d'ions	boues	rétentat
Recyclage des fournitures opérationnelles	oui (réactivat)	non	non	-
Coûts globaux* par année [CHF/a]	107.120 - 211.850	161.870 - 409.430	180.910 - 271.369	407.050 - 523.700
Coûts globaux* spécifiques [CHF/m³]	0,49 - 0,97	0,74 - 1,87	0,83 - 1,24	1,86 - 2,39

* $Q_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $\sum \text{PFC} 1 - 10 - 50 - 100 \text{ } \mu\text{g}/\text{l}$:
→ \sum charge en PFC : 0,2 - 2 - 10 - 20 kg/a

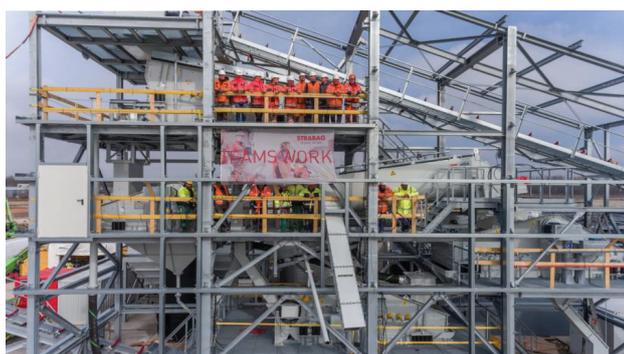
1,09 CHF - 1,00 €

14 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

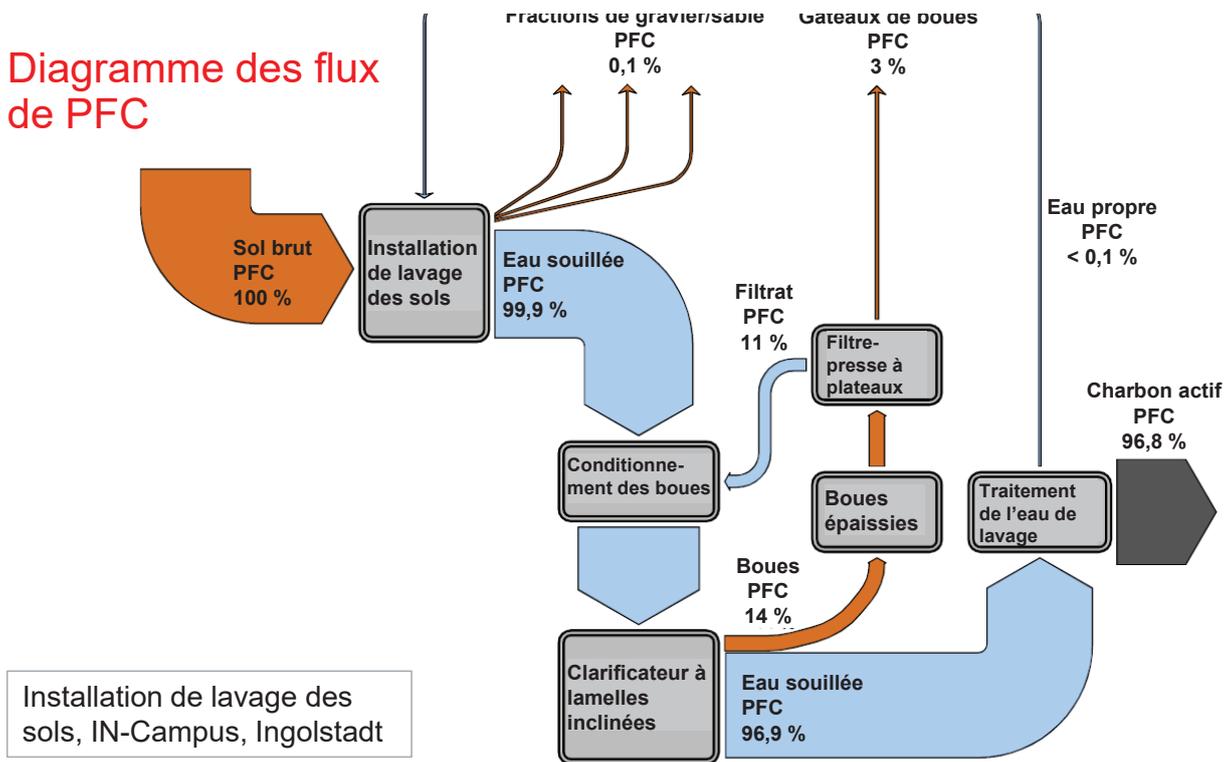


IN-Campus, Ingolstadt - Installation de lavage des sols



- **Traitement des boues / eau**
 - Flocculation/ sédimentation /filtration
 - Conditionnement des boues au filtre-pressé à plateaux
 - Adsorption sur charbon actif
 - Recyclage de l'eau/ recirculation de l'eau
- **Site**
Terrain de l'ancienne raffinerie, Ingolstadt
- **Autorisation**
conf. à l'ordonnance allemande sur la protection contre les nuisances (BImSchV)
- **Exploitation**
 - depuis 08/2018
 - par ARGE Sanierung (groupe de travail Assainissement) IN-Campus GbR
- **Lavage des sols**
- traitement des sols mécanique par voie humide
- **Types de polluants**
- HAM, HCP, PFC
- **Flux de procédé**
 - 1.200 t/j matière solide à l'entrée
 - jusqu'à max. 10 % de boues
- **Sol nettoyé**
→ Réintégration sur le site

Diagramme des flux de PFC



17 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

IN-Campus, Ingolstadt – Sécurisation hydraulique en aval



Polluants

- HAM (surtout BTEX), HC (C5-C9), HC (C10-C40)
- PFC (surtout PFOS)

Flux volumique

- 180 - 210 m³/h (avec réglage du niveau)

Exploitation

- depuis le 1^{er} mars 2018 (env. 17 mois)
- env. 2.372.000 m³ (07/2019)
- le filtre à eau au charbon actif n'a pas dû être changé jusqu'à présent

Valeurs à l'entrée (capacité de nettoyage) [µg/l]

- HC (C10-C40) : ≤ 200 (≤ 0,1)
- HC (C5-C9) : ≤ 20 (≤ 0,1)
- HAM : ≤ 20 (≤ 0,1)
- Σ PFC (13 subst.) : ≤ 0,2 (≤ 0,01)
- PFOS : ≤ 0,02 (≤ 0,01)

18 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Résumé

Lavage des sols

- Sols sablo-graveleux, faible teneur en matières fines
- Traitement boues / eau essentiel

Assainissement des eaux souterraines

- Concentrations en PFC : gén. 1-100 µg/l
- Adsorption sur charbon actif: avantageux & indispensable
- Alternatives : floculation / procédé à membranes
- Tenir compte des éléments perturbateurs

Facteurs de succès

- Investigation
- év. tests sur le terrain
- Savoir-faire
- Expérience
- Offre contraignante

19 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.

Encore des questions?



Dr Hans-Georg Edel
Tél. +49 711 8202 -249
hans-georg.edel@zueblin.de

Julien Bendler
Tél. +33 388 68 79 91
julien.bendler@zueblin.de



Publications

Edel H-G, Klopp D, Drubel J, Korte D, Kellner C, Rehnig U (2018) PFC-Grundwassersanierungen: Stand der Technik und Kostenvergleich, HdA

Bendler J, Bossert F, Brun S (2019) Traitement du site de l'ancienne raffinerie de Bayernoil à Ingolstadt (Allemagne) pour la reconversion en Parc technologique, EIN N°419, 43



Brochure

IN-Campus. Vom Raffineriestandort zum Spitzentechnologiezentrum. Sanierung des ehemaligen Bayernoil-Raffineriegeländes Ingolstadt; Hrsg. IN-Campus GmbH, Juni 2018

20 © DrEd, Züblin Umwelttechnik GmbH, 12 nov. 2019

ZÜBLIN
TEAMS WORK.