



Une étude réalisée pour le compte du VSA

Evaluation des indicateurs énergétiques et des coûts
des procédés d'élimination des micropolluants dans les
STEP

Rapport technique

No. d'objet 1490.26

Winterthur, 28 septembre 2024

HUNZIKER **BETATECH**

EINFACH.
MEHR.
IDEEN.

Mentions légales :

Nom du projet : Evaluation des indicateurs énergétiques et des coûts des procédés d'élimination des micropolluants dans les STEP

Image de couverture : Galerie des conduites du filtre à sable de la STEP de Morgental

Date de création : 28 septembre 2024

Dernière mise à jour : 28 septembre 2024

Auteur : Hunziker Betatech AG
Pflanzschulstrasse 17
8400 Winterthur

Tél. 052 234 50 50
Courrier électronique : info@hunziker-betatech.ch

Noah Joller
Thomas Hug

Groupe d'experts : Nathalie Hubaux, STEP Neugut
Ingo Schoppe, STEP du lac de Thoune
Thomas Bhend, STEP Wetzikon
Thomas Klaus, STEP de Schöna
Urs Holliger, AWEL
Sébastien Lehmann, OFEV
Beat Kobel, Ryser Ingenieure AG
Pascal Wunderlin, VSA

fichier : H:\2 Projets\1000-\1400-\1490\1490.26 Evaluation des chiffres clés MP\04 Rapports\1490.26 240928 b Chiffres clés MP.docx



Table des matières

1	Résumé	3
2	Introduction	4
2.1	Situation de départ	4
2.2	Objectif	4
2.3	Groupe d'experts	4
3	Principes de base	5
4	Méthodologie	5
4.1	Définition des indicateurs dans la recommandation VSA 2018	5
4.2	Délimitations de parties d'installations	5
4.3	Paramètres de normalisation	6
4.4	Coûts	7
4.5	Énergie primaire et CO ₂	9
4.6	Installations évaluées	10
5	Résultats	13
5.1	Capacité d'élimination MP	13
5.2	Coûts d'investissement	14
5.3	Valeur de remplacement	16
5.4	Frais d'exploitation	18
5.5	Coûts annuels	20
5.6	Consommation électrique de l'étage principal MP (sans post-traitement)	22
5.7	Consommation électrique du post-traitement MP (sans étape principale)	24
5.8	Consommation d'électricité MP totale (étape principale et traitement secondaire)	26
5.9	Consommation de charbon actif	28
5.10	Consommation d'oxygène	30
5.11	Consommation d'énergie primaire	32
5.12	Équivalents CO ₂	34
6	Conclusion	37
6.1	Coûts	37
6.2	Consommation électrique	37
6.3	Consommation en réactif	37
6.4	Équivalents CO ₂	38
6.5	Généralités	38
6.6	Perspectives	38
	Liste des abréviations	39
	Annexes	39

1 Résumé

Dès 2016, les premières installations d'élimination des micropolluants organiques dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP) ont été mises en service en Suisse. L'élimination des micropolluants nécessite de l'énergie, des ressources humaines, matérielles et financières. Il est généralement intéressant de saisir ces données, de les évaluer sous forme d'indicateurs et de les comparer entre elles. Cette étude examine 13 installations d'élimination des micropolluants (installations MP) et a pour objectif de mettre en œuvre et d'évaluer une saisie uniforme des données conformément à la recommandation VSA "Définition et standardisation des indicateurs pour les procédés d'élimination des micropolluants dans les STEP" de 2018. Six installations d'ozone, cinq installations de charbon actif en poudre (CAP) et deux installations de charbon actif en granulés (CAG) ont été analysées.

Les performances d'élimination annuelles moyennes des installations se situant entre 75 % et 90 %, l'objectif d'épuration de 80 % est majoritairement atteint. En règle générale, les installations de MP étudiées remplissent de manière fiable les objectifs d'épuration prescrits par la loi.

Les valeurs de remplacement des installations MP varient fortement, entre 70 - 300 CHF/EH ou 150 - 670 CHF/Hracc et 9'000 - 65'000 CHF/(L/s) (débit d'eau de dimensionnement). On ne constate pas de différences de coûts systématiques entre les installations d'ozone, de CAP et de CAG. Les valeurs de remplacement et les coûts d'exploitation présentent une large dispersion, ce qui est dû aux conditions individuelles telles que la composition des eaux usées, le terrain de construction et la disposition de l'installation.

Les coûts d'exploitation annuels se situent entre 1,5 - 11 CHF/(EH*a) ou 2,5 - 17 CHF/(Hracc *a) ou 0,02 - 0,09 CHF/m³ (quantité d'eaux usées traitées). Si l'on tient également compte des frais financiers (intérêts et amortissement), les coûts annuels se situent dans une fourchette d'environ 7 à 32 CHF/(EH*a), 12 - 55 CHF/(Hracc *a) ou 0.07 - 0.27 CHF/m³ (quantité d'eaux usées traitées).

La consommation totale d'électricité des installations MP se situe entre 2 - 9 kWh/EH*a ou 0,02 - 0,1 kWh/m³, les installations d'ozone ayant tendance à consommer plus d'électricité que les installations avec du charbon actif.

La consommation d'énergie primaire, qui tient compte des réactifs importés, varie entre 10 - 80 kWh/EH*a ou 0,1 - 0,8 kWh/m³, sans qu'aucune différence significative ne soit constatée entre les installations d'ozone, de CAP et de CAG.

La consommation d'oxygène des installations d'ozone est de 1 - 5 kg/EH*a ou 10 - 55 mg/L (quantité d'eaux usées traitées), tandis que la consommation de charbon actif des installations CAP et CAG est comprise entre 0,5 - 2 kg/EH*a ou 5 - 20 mg/L. Aucune différence significative n'a été constatée dans la consommation de charbon actif entre les installations de CAP et de CAG.

Les équivalents CO₂ pour les installations d'ozone, se situent dans une fourchette de 1 à 4 kg CO₂ /EH*a. Les installations au charbon actif ont une empreinte carbone plus importante que les installations à l'ozone, en particulier si elles utilisent du charbon issu de matières premières d'origine fossile. Les équivalents CO₂ pour les installations au charbon actif utilisant du charbon actif issu de matières premières d'origine fossiles, sont de 6 - 23 kg CO₂ /EH*a, alors que des valeurs plus faibles de 3 - 7 kg CO₂ /EH*a ont été observées pour les matières premières biogènes. L'utilisation de matières premières biogènes et la réactivation du charbon offrent donc un grand potentiel de réduction des émissions de CO₂.

En raison de la dispersion relativement importante des données observées, il n'est pas recommandé d'établir des courbes de régression ou des moyennes à partir des données relevées. Chaque installation de MP est un cas particulier, conçu pour répondre à des exigences locales. Cela signifie qu'il n'est pas possible de déduire des données disponibles une prévision de référence pour des installations futures. Les données se prêtent toutefois très bien à une observation dans le contexte national.

2 Introduction

2.1 Situation de départ

Depuis 2016, certaines STEP suisses sont légalement tenues de prendre des mesures pour éliminer les micropolluants. Depuis, les premières installations ont été planifiées, construites et mises en service avec succès.

L'élimination des micropolluants nécessite de l'énergie, des ressources humaines, matérielles et financières et il est généralement intéressant de collecter ces données, de les évaluer sous forme d'indicateurs et de les comparer entre elles.

En 2018, la recommandation VSA "Définition et standardisation des indicateurs pour les procédés d'élimination des micropolluants dans les STEP" [1] a donc été publiée. On y définit quelles grandeurs d'entrée sont saisies (par installation et par année), comment elles sont calculées et comment les chiffres relatifs des installations MP sont isolés du reste de la STEP.

2.2 Objectif

Depuis, des données d'exploitation de quelques installations de MP sont maintenant disponibles. Il est donc utile de procéder à une première évaluation comparative.

L'objectif de ce projet était de collecter et d'évaluer des données conformément à la recommandation du VSA de 2018. Il ne s'agissait pas de réaliser un benchmarking, le niveau de détail des données collectées n'étant pas suffisant pour cela.

2.3 Groupe d'experts

Comme il s'agissait de la première évaluation de ce type, le projet a été conduit par un groupe d'experts composé d'exploitants de STEP, d'autorités cantonales d'exécution, de l'OFEV, du VSA et de bureaux d'ingénieurs (voir impressum). Le concept de la saisie des données, le choix des grandeurs calculées, celui des résultats et la conclusion de l'étude ont été évalués au sein de ce groupe.

3 Principes de base

- Données d'exploitation (quantités d'eaux usées, charges entrantes, consommations électriques, mesures en laboratoire, etc.), données d'état (taille de l'extension, habitants raccordés, etc.), données de coûts (décomptes de construction, coûts d'électricité, coûts de fonctionnement, coûts de personnel, etc.) de 13 STEP.
- Divers documents de planification de la STEP.
- [1] Recommandation VSA "Définition et standardisation des indicateurs pour les procédés d'élimination des micropolluants dans les STEP", 2018, www.micropoll.ch
- [2] EcolInvent Datenbank v3.3, Modul: "market for electricity, medium voltage [CH]"
- [3] EcolInvent Datenbank v3.3, Modul: "market for oxygen liquid [RER]"
- [4] EcolInvent Datenbank v3.3, Modul: „transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]"
- [5] Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung - Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 „Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen“. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016(63) Nr. 12, S.1062-1067, www.micropoll.ch
- [6] Aqua & Gas 01/24 «MV-Stufen stabil betrieben», Brander A., Wunderlin P., Gulde R., Böhler M. 2024, www.micropoll.ch
- [7] Office fédéral de l'environnement, Berne, Connaissance de l'environnement n° 1214 : 210 S "Micropolluants issus des eaux usées urbaines. Procédé pour une élimination plus poussée dans les stations d'épuration" Abegglen C., Siegrist H. 2012, www.bafu.admin.ch

4 Méthodologie

4.1 Définition des indicateurs dans la recommandation VSA 2018

Pour calculer des ratios comparables, les valeurs d'entrée sont à chaque fois converties en une grandeur calculée. Il existe différentes possibilités de combiner les grandeurs d'entrée en ratios. La définition et la délimitation des grandeurs d'entrée ainsi qu'une première sélection d'indicateurs à calculer sont définies dans la recommandation VSA "Définition et standardisation des indicateurs pour les procédés d'élimination des micropolluants dans les STEP" [1]. La méthodologie étant déjà décrite en détail dans le document précité, seuls les grands principes de la méthodologie sont expliqués ci-après.

4.2 Délimitations de parties d'installations

Selon la recommandation VSA de 2018 [1], toutes les étapes nécessaires aux procédés des installations de MP sont comptées à 100% dans le traitement MP, à l'exception des parties de l'installation obligatoirement nécessaires à l'épuration biologique.

- Exemple 1 : s'il existe déjà une filtration à la STEP, celle-ci est désormais attribuée au traitement des MP car une filtration fait obligatoirement partie du procédé des MP.
- Exemple 2 : filtration par floculation : les réactifs sont affectés à l'usage principal : le fer est affecté à la STEP, les floculants et les CAP sont affectés au niveau MP.
- Exemple 3 : les coûts d'investissement comprennent les coûts nécessaires à la construction d'une nouvelle partie de l'installation. Si une installation d'ozone est construite et qu'une filtration sur sable existe déjà,

le réacteur d'ozone et les nouveaux équipements sont ajoutés aux coûts d'investissement. La valeur de remplacement comprend également les constructions existantes telles que la filtration.

- Exemple 4 : l'installation MP est divisée en une étape principale et un traitement secondaire. L'étape principale est typiquement un réacteur de contact pour l'ozone ou le charbon actif, éventuellement avec une décantation secondaire pour le recyclage des boues de CAP. Les post-traitements associés seraient une filtration pour la rétention des CAP ou une étape biologiquement active pour la dégradation des produits de réaction. Une station de relevage est attribuée au traitement secondaire.

4.3 Paramètres de normalisation

Une normalisation est nécessaire pour convertir les valeurs d'entrée en une grandeur calculée (ratio). Les paramètres suivants ont été utilisés pour cette étude :

- Equivalent-habitants (EH) : les EH indiquent la charge arrivant dans l'installation de MP. Cette charge est déterminante pour les coûts d'exploitation et la consommation de réactifs. Les EH sont calculés pour chaque année d'exploitation au moyen de la charge de DCO à 85% dans les eaux usées brutes. La charge spécifique est supposée être de 120 g/EH*d. La charge de l'installation varie d'une année à l'autre. Si une valeur d'entrée diffère d'une année à l'autre, comme par exemple la consommation d'électricité, un ratio est calculé pour chaque année d'exploitation avec les EH actuels. Si une valeur d'entrée ne change pas pendant l'exploitation (par exemple la valeur de remplacement), un ratio est calculé avec les EH moyens de toutes les années d'exploitation étudiées.
- Habitants raccordés (Hracc) : les Hracc comprennent toutes les personnes physiques raccordées à la STEP concernée. Les habitants raccordés varient d'une année à l'autre. Les Hracc sont pertinents pour le financement des installations par la Confédération. Pour le dimensionnement ou la charge d'une installation de MP, les Hracc jouent un rôle secondaire.
- Débit d'eau de dimensionnement (Q_{dim}) : le débit d'eau de dimensionnement Q_{dim} est déterminant pour les coûts de construction ou la valeur de remplacement d'une installation de MP car les bassins et les tailles de filtres sont conçus en fonction du temps de séjour hydraulique. Certaines installations MP ont été conçues comme des traitements à débit partiel. Ces installations sont également conçues pour une élimination totale des 12 substances de 80% par rapport à l'entrée de la STEP. Deux débits d'eau de dimensionnement différents peuvent donc être utilisés pour le calcul des indicateurs : Q_{dim} STEP et Q_{dim} MP. Dans cette étude, les deux débits de dimensionnement ont été pris en compte.
- Quantité d'eaux usées traitées (m^3) : la quantité d'eaux usées traitées correspond à la somme annuelle du débit d'alimentation de l'installation de MP pendant l'année d'exploitation correspondante.

4.4 Coûts

4.4.1 Répartition des coûts de construction en corps de métier

Tous les coûts d'investissement (avant indemnisation par la Confédération) ont été répertoriés dans les catégories ci-dessous. Les coûts qui n'ont pas pu être attribués à l'une des catégories ont été répartis au prorata entre les différentes catégories (p. ex. honoraires). Si seuls les coûts totaux étaient connus, ils ont été répartis avec des pourcentages supposés (voir Tableau 1).

Tableau 1: Part des coûts par corps de métier et durée d'amortissement

Catégorie	Part présumée des coûts totaux si inconnue	Durée d'amortissement
Génie civil / bâtiment	45%	50 ans
Technique électromécanique, y compris les conduites (TEM)	25%	15 ans
Technique de chauffage, de ventilation, de climatisation et sanitaire (CVCS)	20%	15 ans
Électrotechnique, technique de mesure, de commande et de régulation (EMCRG)	10%	10 ans

4.4.2 Coûts d'investissement, valeur de remplacement, frais financiers et renchérissement

Les coûts d'investissement comprennent les coûts réellement encourus pour la création d'une installation de MP. Exemple : si une installation d'ozone est construite et qu'une filtration sur sable existe déjà, seuls le réacteur d'ozone et les nouveaux équipements composent les coûts d'investissement. La valeur de remplacement de l'installation de MP comprend non seulement les parties de l'installation nouvellement construites, mais aussi, le cas échéant, les constructions existantes nécessaires à l'élimination des micropolluants (comme la filtration). Afin de permettre une comparaison uniforme des coûts d'investissement et des valeurs de remplacement, les coûts ont été corrigés en fonction du renchérissement.

Les coûts ont été extrapolés à l'aide des indices suivants à la date de comparaison de décembre 2023 :

- Construction : KBOB.MAT.HB (indice des prix des matériaux de construction Bâtiment).
- EMT : KBOB 28.13 (indice des prix des pompes et compresseurs).
- HLKS : KBOB 28.14 (indice des prix de la robinetterie sanitaire et de chauffage).
- EMSRL : KBOB 26.51 (indice des prix des instruments de mesure et de contrôle).

Les coûts annuels du capital se composent des coûts d'amortissement et des coûts d'intérêt :

- Frais d'amortissement : valeur de remplacement (catégorie x) / durée d'amortissement (catégorie x).
- Coût des intérêts : (valeur totale de remplacement) / 2 * taux d'intérêt.
- Taux d'intérêt supposé : 2,5%.

4.4.3 Frais de fonctionnement

Les frais de fonctionnement annuels se composent des frais de personnel et des frais de matériel.

- Frais de personnel
 - En règle générale, les STEP n'effectuent pas de relevés d'heures détaillés pour les installations de MP. Les coûts de personnel se basent donc sur des estimations des exploitants des installations. Des charges horaires annuelles ont parfois été indiquées. Pour le calcul des frais de personnel, on a supposé un montant de 75 CHF/h (charges salariales comprises).

Les coûts d'exploitation comprennent les moyens d'exploitation, les frais de laboratoire ainsi que les frais d'entretien et de location.

- Ressources :
 - Charbon actif (quantité annuelle livrée et facturée).
 - Oxygène (quantité annuelle livrée et facturée).
 - Réactif de floculation : quantité effectivement consommée au niveau MP.
 - Electricité : (quantités d'électricité consommées dans la catégorie TEM) * (prix moyen effectif de l'électricité) (selon décompte avec la compagnie d'électricité, y compris la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC), facteurs de pointe, etc.).
- Frais de laboratoire :
 - Analyses en laboratoire externes des substances indicatrices.
 - Divers produits chimiques de laboratoire.
- Frais de maintenance et de location :
 - Par exemple, frais annuels de location d'un réservoir d'oxygène liquide.
 - Par exemple, coûts annuels des contrats de maintenance pour l'équipement

En raison de la composition hétérogène des coûts d'exploitation, ceux-ci n'ont pas été corrigés selon l'inflation ; ils sont présentés au prix effectifs de l'année d'exploitation correspondante.

4.5 Énergie primaire et CO₂

L'énergie primaire comprend l'énergie disponible dans la source initiale ainsi que l'énergie nécessaire pour l'extraire, la transformer et l'utiliser. L'énergie primaire nécessaire à la construction d'une installation n'est pas prise en compte. Les limites du système pour les équivalents CO₂ sont les mêmes que pour l'énergie primaire.

La consommation annuelle d'énergie primaire ainsi que les équivalents CO₂ sont calculés sur la base de la quantité de réactifs consommés et d'un facteur. Pour cette étude, conformément à la recommandation VSA 2018 [1], ce sont les facteurs de conversion présentés dans le Tableau 2 qui ont été utilisés. Les émissions de CO₂ pour la production de charbon actif dépendent fortement de la matière première et du degré de combustion (houille ou lignite). C'est pourquoi un facteur moyen a été retenu pour le charbon actif issu de matières premières fossiles. Selon la matière première utilisée, les équivalents CO₂ peuvent toutefois être nettement plus élevés. Une déduction détaillée des facteurs de calcul est disponible dans la recommandation VSA de 2018 [1]. Le produit à base de charbon actif utilisé par la STEP concernée n'a pas été recensé dans le cadre de cette étude, mais uniquement la quantité consommée. C'est pourquoi deux scénarios ont été calculés pour les équivalents CO₂ : le premier est basé sur des matières premières fossiles et le second sur des matières premières biogènes ou réactivées.

Tableau 2 : facteur de calcul pour l'énergie primaire et les équivalents CO₂

Facteur de calcul	Valeur	Source
Electricité (énergie primaire) :	2,3 kWh/kWh	[2]
Electricité (équivalents CO ₂) :	89 gCO ₂ /kWh	[3]
Oxygène liquide (énergie primaire) :	2,04 kWh/kg	[3], [4]
Oxygène liquide (équivalents CO ₂) :	0,65 kg CO ₂ /kgO ₂	[3], [4]
Charbon actif moyen issu de matières premières fossiles (frais) (énergie primaire) :	30 kWh/kg _{CA}	[5], [4]
Moyenne des charbons actifs issus de matières premières fossiles (frais) (équivalents CO ₂) :	11 kg CO ₂ /kg _{CA}	[5], [4]
Charbon actif issu de matières premières biogènes, ou réactifs CAG (énergie primaire) :	7 kWh/kg _{CA}	[5], [4]
Charbon actif biogène issu de matières premières biogènes, ou réactifs CAG (frais) (CO ₂ équivalents) :	3 kg CO ₂ /kg _{CA}	[5], [4]

4.6 Installations évaluées

Pour cette étude, les données de 13 installations de MP ont été évaluées. Tableau 3 montre les installations évaluées qui sont classées selon le débit d'eau de dimensionnement (Q_{dim} STEP). Dans les chapitres suivants, les STEP ne sont pas nommées pour des raisons de simplicité mais renvoyées au moyen de "ID STEP". En annexe se trouvent des fiches descriptives avec une brève description des différents procédés de MP.

Tableau 3: Installations évaluées pour l'étude des chiffres clés

ID	STEP	Procédé	Flux partiel / Flux total	Mise en service	Années de fonctionnement évaluées
A	Penthaz	CAG en lit fluidisé	Flux total	2018	2019-2022
B	Egg-Oetwil am See	CAP avant le filtre à sable	Flux total	2020	2021-2022
C	Eich, Bassersdorf	Ozonation	Flux total	2018	2019-2022
D	Porrentruy	Ozonation	Flux total	2020	2021-2022
E	Bachwis, Herisau	CAP, méthode d'Ulm	Flux partiel	2015	2016-2022
F	Moos, Hefenofen	Filtration CAG	Flux total	2021	2022
G	Reinach	Ozonation	Flux total	2016	2018-2022
H	Flos, Wetzikon	CAP en biologie	Flux total	2019	2020-2022
I	Neugut, Dübendorf	Ozonation	Flux total	2014	2015-2022
J	Morgental, Steinach	Ozonation	Flux partiel	2021	2022
K	Lac de Thoune, Uetendorf	CAP, méthode d'Ulm	Flux partiel	2018	2019-2022
L	Schönau, Cham	CAP avant le filtre à sable	Flux total	2019	2020-2022
M	Werdhölzli, Zurich	Ozonation	Flux total	2018	2019-2022

Le mode de présentation des indicateurs est expliqué ci-après à l'aide de deux exemples tirés des données saisies ; les indicateurs sont à chaque fois brièvement expliqués dans un encadré. Ensuite, les chiffres clés sont représentés sous forme de graphiques. Sous chaque graphique se trouvent les remarques et les observations importantes.

L'exemple 1 (voir ci-dessous) montre la taille des installations dans un diagramme au format x-y, où l'axe x et l'axe y sont tous deux gradués avec des valeurs numériques. Figure 1 montre une comparaison entre la charge de l'installation en EH et la capacité hydraulique maximale des STEP étudiées. Chaque point de données correspond à une STEP. Les différents procédés sont indiqués par des couleurs : CAP (noir), CAG (rouge), ozone (bleu).

L'exemple 2 (voir page suivante) montre la part industrielle au format "ID STEP", où seul l'axe des y a une échelle numérique. Cela permet d'attribuer lisiblement les points de données à une installation spécifique,

ce qui facilite l'interprétation. Les différents procédés sont également identifiés par des couleurs - comme décrit ci-dessus.

Exemple 1 - Taille de l'installation

Définition : Les EH se réfèrent aux charges entrantes de DCO à 85% dans les eaux usées brutes à l'entrée de la STEP. Pour la figure 1, les EH ont été moyennés sur plusieurs années d'exploitation évaluées afin de déterminer une valeur unique. Le Q_{dim} STEP se réfère à la capacité hydraulique maximale de la STEP étudiée. Attention : la capacité hydraulique maximale de la STEP peut différer de la capacité de l'étape MP (p. ex. traitements MP en flux partiel).

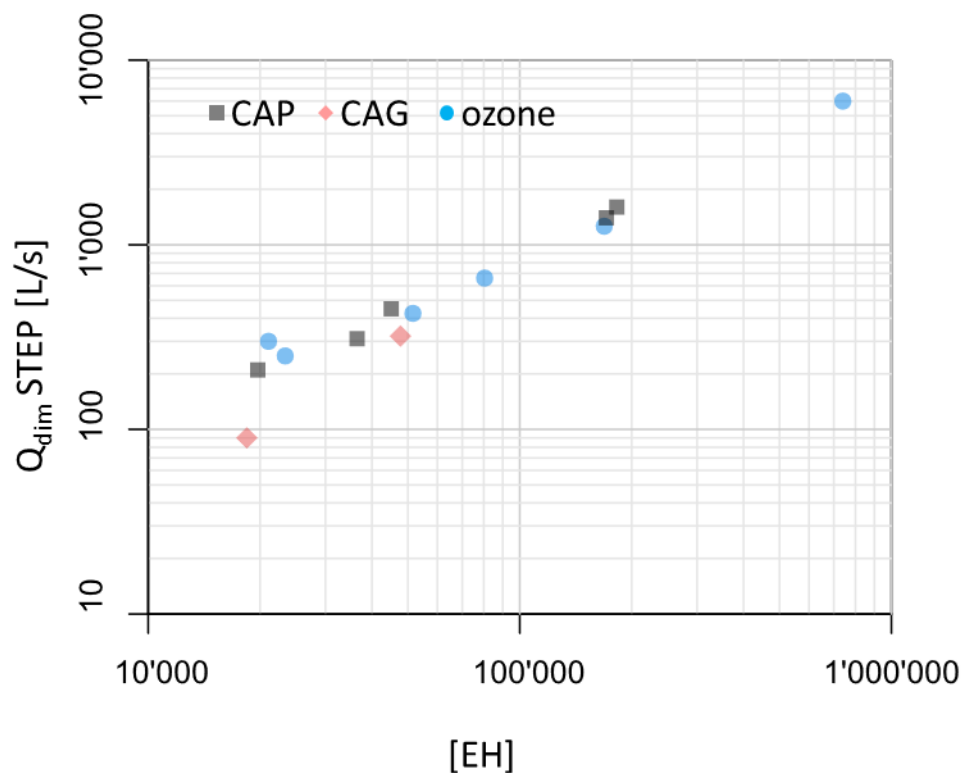


Figure 1: moyenne EH sur les années d'exploitation étudiées (axe x) et capacité hydraulique maximale des STEP étudiées (axe y).

- Les installations étudiées couvrent une plage de taille comprise entre 18 000 EH et 700 000 EH.
- Les capacités hydrauliques des STEP étudiées se situent entre 200 L/s et 6'000 L/s.
- Dans le diagramme doublement logarithmique, les points de données se trouvent approximativement sur une ligne droite. Cela met en évidence une relation non linéaire entre les EE et la conception hydraulique des STEP.

Exemple 2 - Part de l'industrie

Définition : La part industrielle d'un bassin versant peut être quantifiée avec le rapport entre la charge entrante et le nombre de personnes physiques dans le bassin versant. Les équivalents-habitants (EH) se réfèrent aux charges entrantes de 85% de DCO dans les eaux usées brutes de la STEP. Les Hracc se réfèrent aux personnes physiques dans le bassin versant d'une STEP. Un rapport de 1 donnerait une part industrielle de 0.

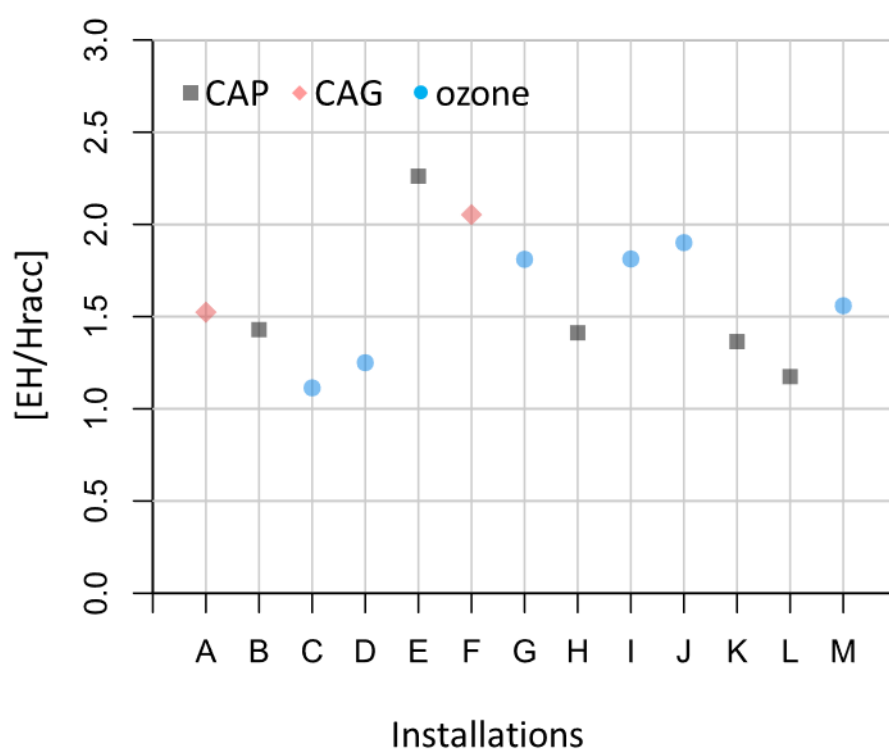


Figure 2: Représentation de la part de l'industrie dans le bassin versant des installations sur la base du rapport entre la charge des installations (EH) et les habitants raccordés (Hracc).

- Les installations présentent des différences significatives en terme de part industrielle.
- L'installation E présente la plus forte proportion d'industries.

5 Résultats

Ce chapitre présente et analyse une sélection de données. Chaque chapitre est structuré de la manière suivante : le thème est d'abord brièvement défini puis une représentation graphique des chiffres clés est proposée. Finalement, un paragraphe énumère les observations et les interprétations.

5.1 Capacité d'élimination MP

Définition : La capacité d'élimination des MP dans chaque STEP est mesurée plusieurs fois par an (6 à 24 fois). L'élimination est déterminée sur la base des concentrations des différentes substances principales en entrée et à la sortie de la STEP. La valeur moyenne des éliminations individuelles de toutes les substances utilisées pour le calcul doit être d'au moins 80%. Pour la représentation suivante, une valeur moyenne a été calculée à partir de toutes les analyses d'élimination sur une année d'exploitation. Un point de données correspond donc à une année d'exploitation.

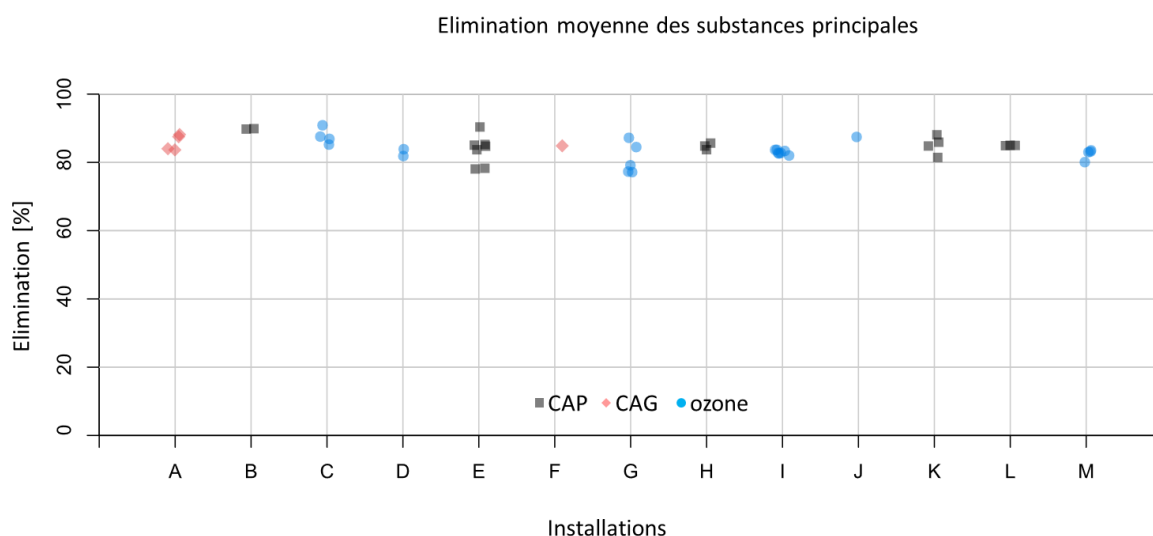


Figure 3: Elimination moyenne des substances principales selon ID STEP. Chaque point de données correspond à une année d'exploitation. Le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification.

Observations, interprétations et explications :

- Les performances d'élimination des installations varient dans une fourchette de 75% à 90%. L'objectif d'épuration de 80% est atteint dans la plupart des cas. Certaines années d'exploitation ou certaines installations sont restées en dessous de l'objectif d'épuration.
- La première année d'exploitation n'est pas systématiquement meilleure ou moins bonne que les années suivantes. Il y a un potentiel d'optimisation limité vis-à-vis de l'objectif d'épuration car il faut tenir compte des incertitudes / variations.

- Les performances d'épuration coïncident pour l'essentiel avec les résultats de l'étude de Brander, Wunderlin, Gulde et Böhler (2024) [6]. Les légères différences sont dues aux périodes d'observation et au mode de représentation.

5.2 Coûts d'investissement

Définition : Les **coûts d'investissement** ne comprennent que les coûts effectifs pour la réalisation d'une installation de MP (avant indemnisation par la Confédération). Exemple : si une installation d'ozone est construite et qu'une filtration sur sable existe déjà, seuls le réacteur d'ozone et les nouveaux équipements sont compris dans les coûts d'investissement. En comparaison, la valeur de remplacement d'une installation de MP (voir plus loin) comprend non seulement les parties de l'installation nouvellement construites, mais aussi les constructions existantes telles que la filtration. Les coûts sont indexés au renchérissement de décembre 2023.

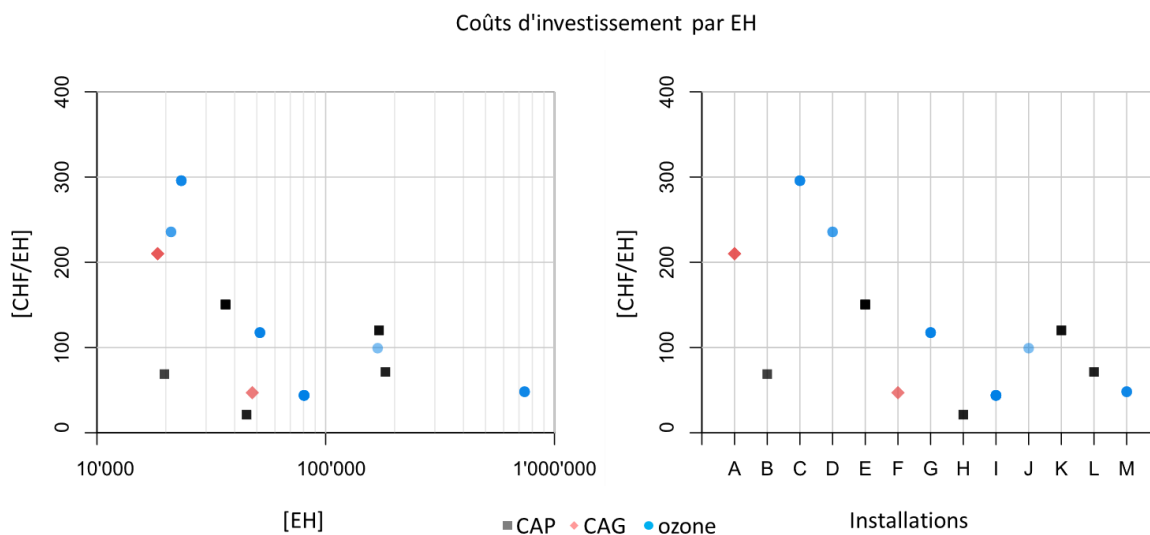


Figure 4: Coûts d'investissement par EH moyen. Gauche : axe des x par EH moyen. A droite : axe des x par installation.

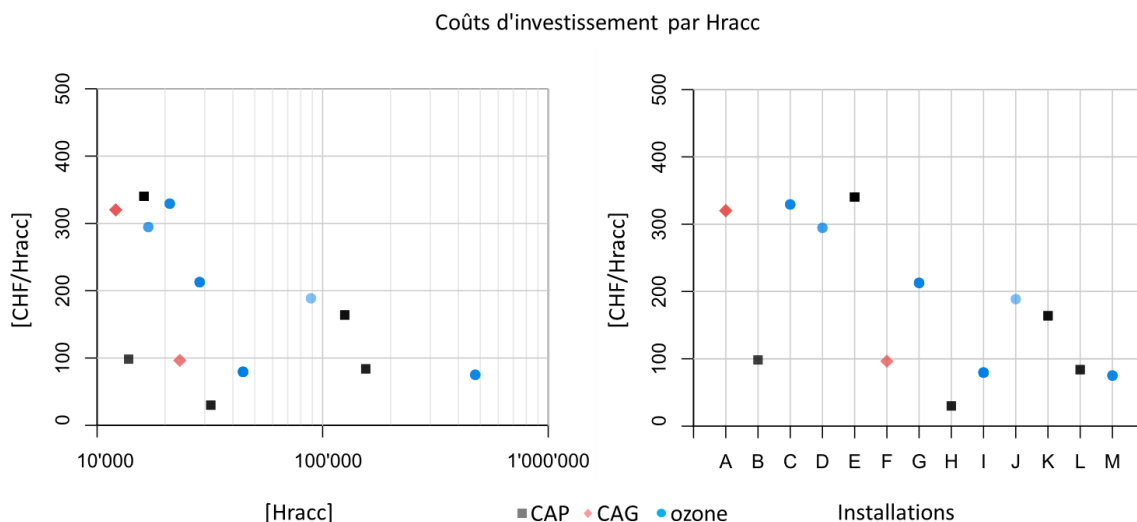


Figure 5: Coûts d'investissement par Hracc moyen. A gauche : axe des x par Hracc moyen . A droite : axe des x par installation.

Observations, interprétations et explications :

- Les coûts d'investissement effectifs (avant indemnisation par la Confédération) se situent dans une fourchette de 20 à 300 CHF/EH, respectivement 25 à 350 CHF/Hracc.
- Attention : certaines installations disposaient déjà, avant les investissements, de parties d'installation nécessaires au traitement des MP (par exemple une filtration). Cela entraîne parfois de grandes différences dans le montant des coûts d'investissement. Les installations suivantes disposaient déjà d'une filtration avant les investissements pour les MP : B, E, F, H, I, L, M
- Les exemples suivants permettent d'illustrer les différences dans le montant des coûts d'investissement spécifiques :
 - Sur l'installation H, un dosage des CAP a été mis en place dans la biologie. Il existait déjà une filtration qui, selon le concept de ce rapport, n'a pas été comptée dans les coûts d'investissement. Il en résulte des coûts d'investissement très faibles.
 - Dans l'installation C, en revanche, une installation d'ozone et un filtre à sable ont été entièrement reconstruits. Les coûts d'investissement sont donc plus élevés.
- Les coûts d'investissement comparent des coûts qui ne sont pas basés sur les mêmes conditions de départ. Par exemple, les investissements pour la construction d'une installation complète (étape principale + filtration) sont comparés aux coûts d'équipements partiels (étape principale uniquement, car la filtration existait déjà).
- Sur la base des exemples cités, il n'est donc pas possible de comparer les installations de manière uniforme sur la base de ces coûts d'investissement. Une comparaison sur la base de la valeur de remplacement (voir paragraphe suivant) est nécessaire.

5.3 Valeur de remplacement

Définition : Les coûts d'investissement ne comprennent que les coûts effectifs pour la réalisation d'une installation de MP (avant indemnisation par la Confédération). Exemple : si une installation d'ozone est construite et qu'une filtration sur sable existe déjà, seuls le réacteur d'ozone et les nouveaux équipements sont compris dans les coûts d'investissement (voir chapitre précédent). La **valeur de remplacement** de l'installation de MP comprend non seulement les parties de l'installation nouvellement construites, mais aussi les coûts des constructions éventuellement déjà existantes qui font partie du niveau MP, comme la filtration. Les coûts sont indexés au renchérissement de décembre 2023.

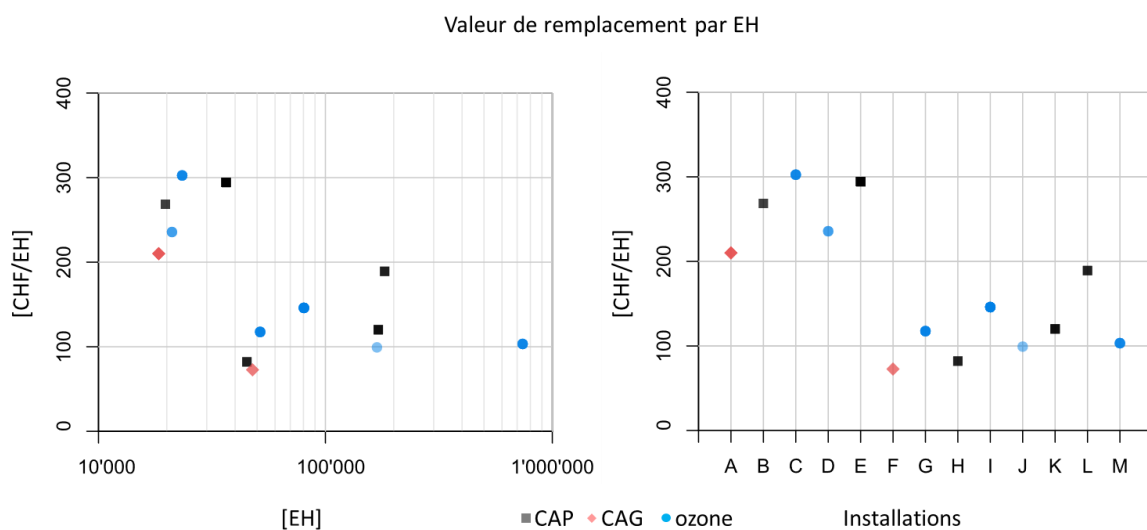


Figure 6: Valeur de remplacement par EH moyen. Gauche : axe des x par EH moyen. A droite : axe des x par installation.

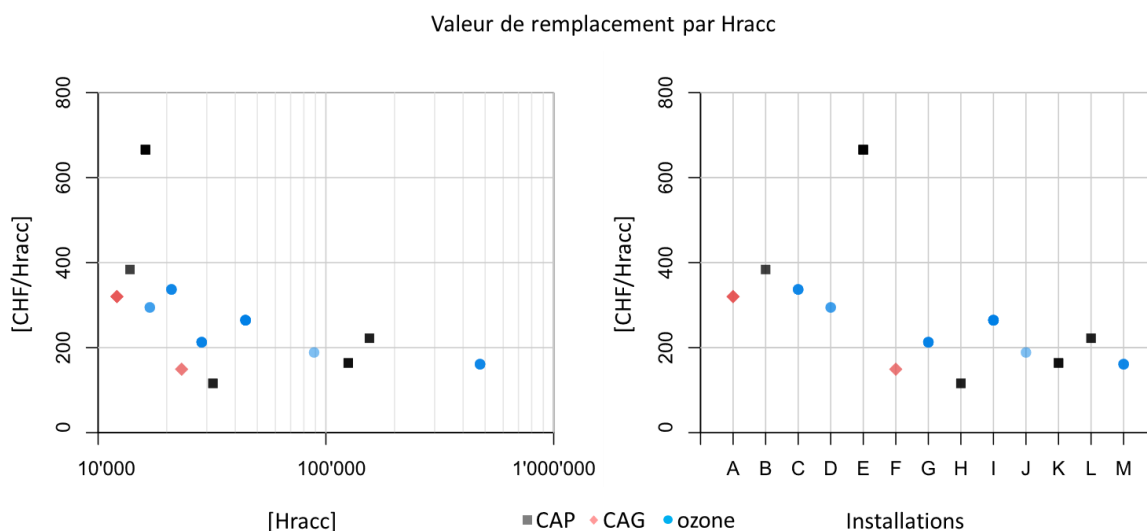


Figure 7: Valeur de remplacement par Hracc. A gauche : axe des x par Hracc. A droite : axe des x par installation.

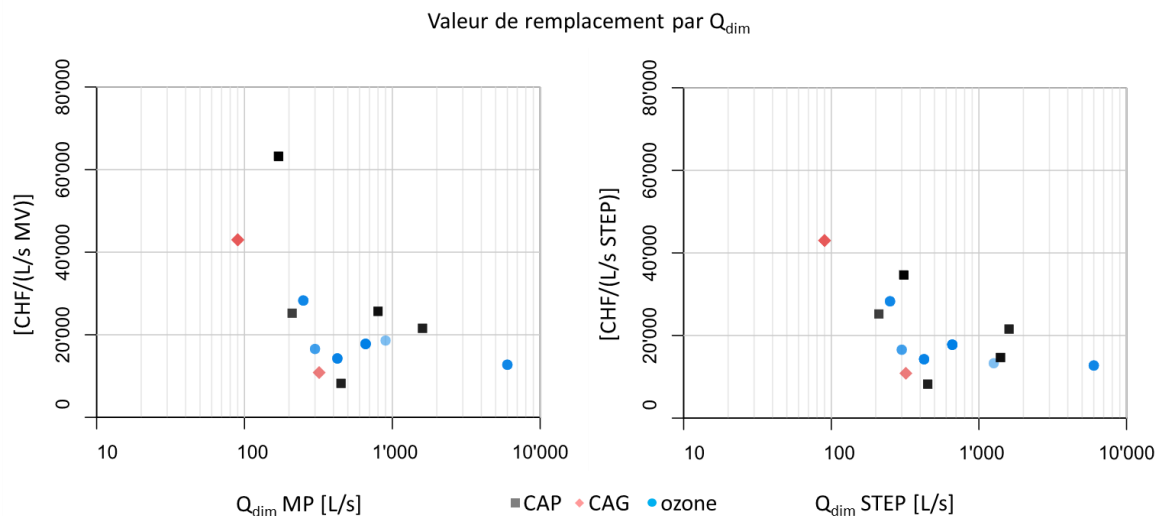


Figure 8: Valeur de remplacement par volume d'eau de dimensionnement. Gauche : par Q_{dim} MP. A droite : par Q_{dim} STEP.

Observations, interprétations et explications :

- Les valeurs de remplacement des installations de MP se situent dans une fourchette d'environ 70 - 300 CHF/EH ou 150 - 670 CHF/Hracc , ou 9'000 - 65'000 CHF/(L/s).
- Selon les paramètres de normalisation (par EH, par Hracc , par Q_{dim}), les valeurs de remplacement se dispersent les unes par rapport aux autres, certainement en raison des différentes proportions en eaux brutes industrielles. On ne peut donc pas observer un effet d'échelle clair.
- Les installations de MP peuvent être conçues en flux total ou en flux partiel. Dans les deux cas, les installations sont conçues pour une élimination totale de 80% des substances principales via la STEP. Les valeurs de remplacement par Q_{dim} MP comparativement aux valeurs de remplacement Q_{dim} STEP sont plus élevées dans le cas des traitements en flux partiel que ceux en flux total.
- On n'observe pas de différences systématiques dans les valeurs de remplacement spécifiques entre les installations d'ozone, de CAP ou de CAG.
- L'installation E a mis en œuvre un procédé Ulmer (bassin de contact CAP + bassin de sédimentation). Il s'agissait de la première installation MP de Suisse, qui a en outre été conçue pour l'élimination de colorants provenant de l'industrie. La valeur spécifique de remplacement est donc élevée. Un procédé Ulm a également été mis en œuvre sur l'installation K, qui présente une faible valeur de remplacement.
- Les installations F et H présentent des valeurs de remplacement très similaires. Les deux installations disposaient déjà d'une filtration sur sable du même type avant la construction d'une installation de MP et dans les deux cas, seuls des rééquipements/modifications mineurs ont été nécessaires. Les valeurs de remplacement similaires sont par conséquent un indice de plausibilité.
- Les parties de l'installation qui existaient déjà avant la construction de la catégorie TEM et qui pouvaient continuer à être utilisées sont prises en compte dans la valeur de remplacement. La valeur de remplacement permet de comparer les installations de manière uniforme.

5.4 Frais d'exploitation

Définition : Les frais d'exploitation comprennent les frais de personnel, les frais de réactifs/consommables, les frais d'électricité, les frais de laboratoire et les contrats tels que ceux de maintenance. En raison de leur composition hétérogène, les coûts d'exploitation ne sont pas corrigés selon l'inflation. Les coûts nominaux des années d'exploitation respectives sont représentés. Les coûts des réactifs ont été déterminés sur la base de la quantité livrée chaque année.

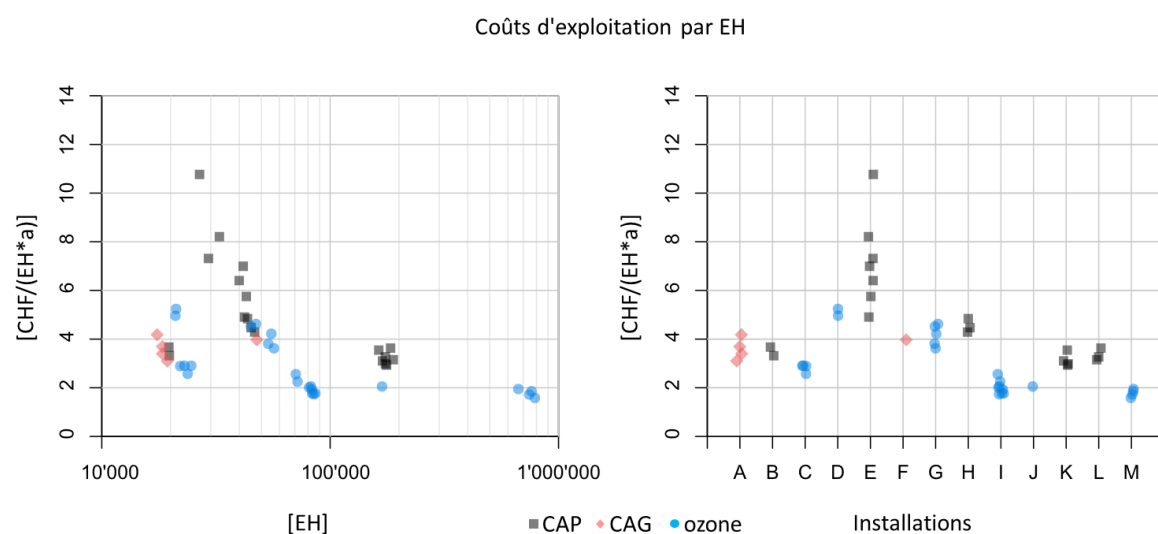


Figure 9: Coûts d'exploitation par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x selon ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

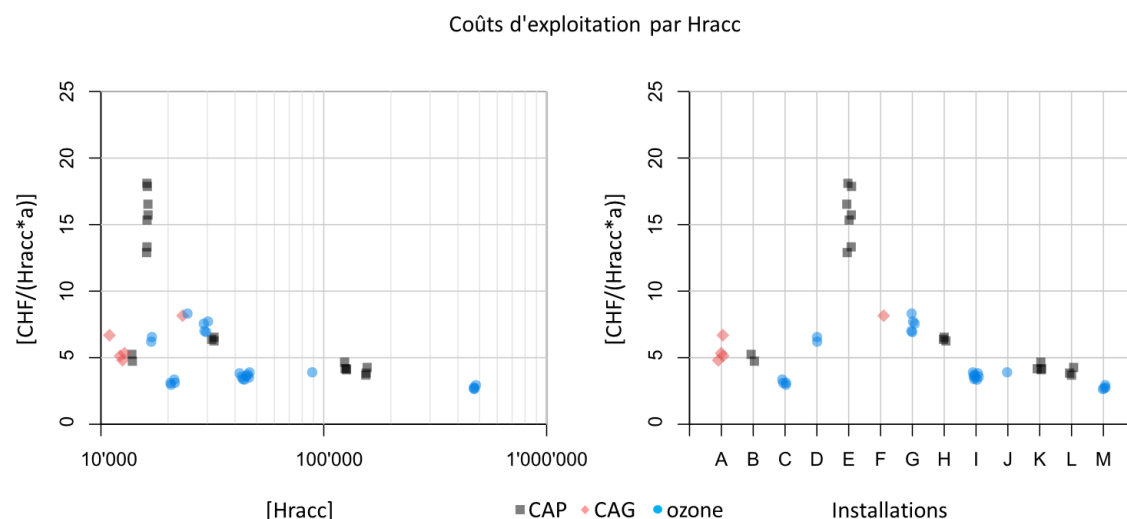


Figure 10: Coûts d'exploitation par Hracc. A gauche : axe des x selon E. A droite : axe des x selon ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

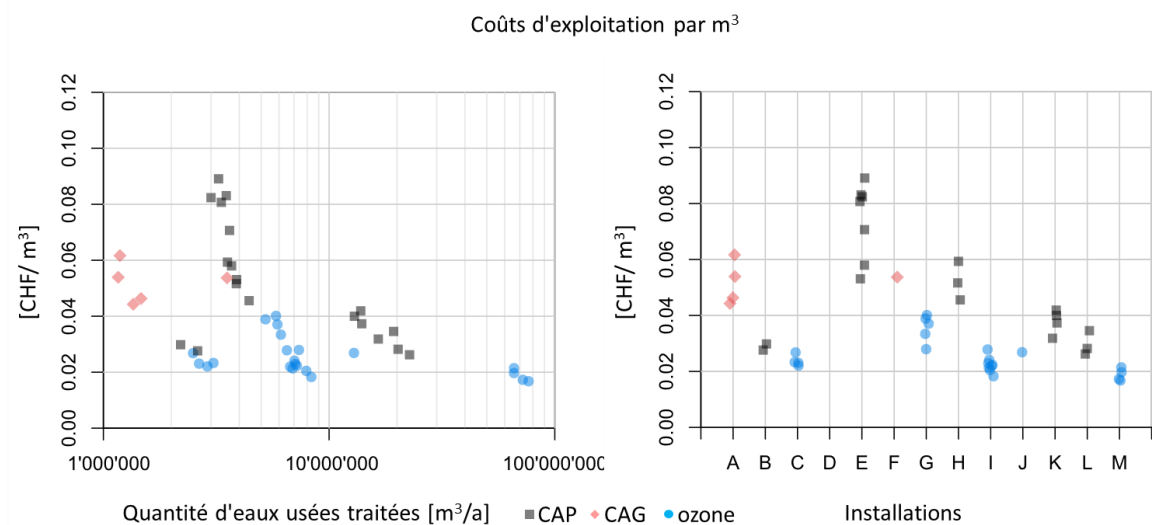


Figure 11: Coûts d'exploitation par mètre cube d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x selon la quantité d'eau traitée. droite : axe des x selon l'ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

Observations, interprétations et explications :

- Les coûts d'exploitation annuels se situent dans une fourchette de 1,5 à 11 CHF/EH*a ou 2,5 à 17 CHF/Hracc *a ou 0,02 à 0,09 CHF/m³.
- L'installation E présente des coûts d'exploitation élevés en raison de la forte influence de l'industrie. Ces coûts varient fortement en fonction de la charge de l'installation et du débit d'entrée.
- La dispersion entre les installations et les années d'exploitation est faible (à l'exception de la STEP E). Les raisons possibles des dispersions sont les variations des quantités d'eau ou des charges annuelles. De plus, des optimisations de l'exploitation peuvent entraîner une dispersion d'une année d'exploitation à l'autre.
- Les coûts ne dépendent pas du procédé. Il n'y a aucune différence significative entre les installations au charbon actif et les installations d'ozone. De plus, on n'observe pas de différence systématique entre les installations à CAG et celles à CAP.

5.5 Coûts annuels

Définition : Les coûts annuels sont composés de la somme des coûts d'exploitation et des frais financiers. Ces derniers sont basés sur la valeur de remplacement et sont constitués des frais d'intérêt et d'amortissement.

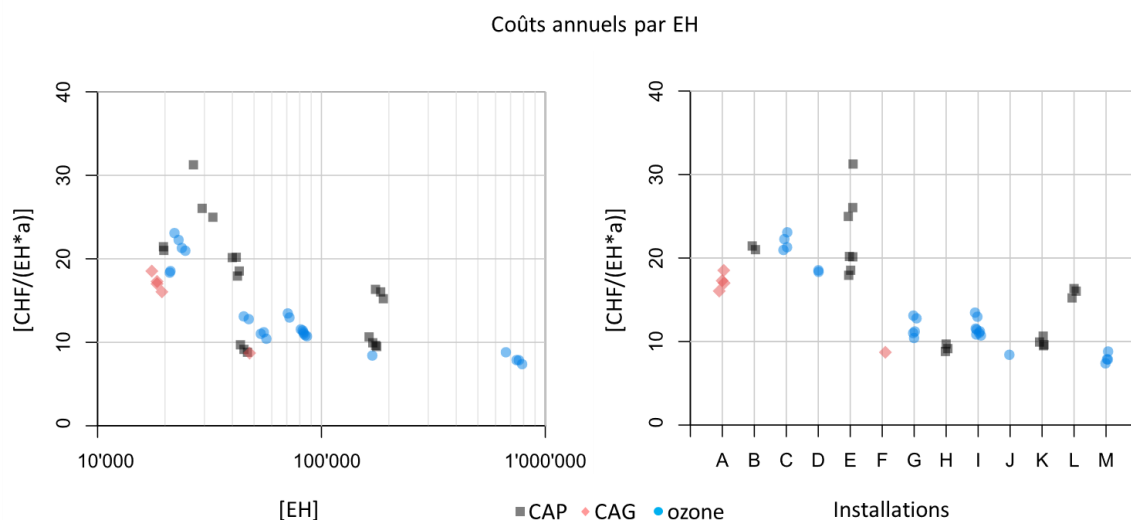


Figure 12: Coûts annuels par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x selon ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

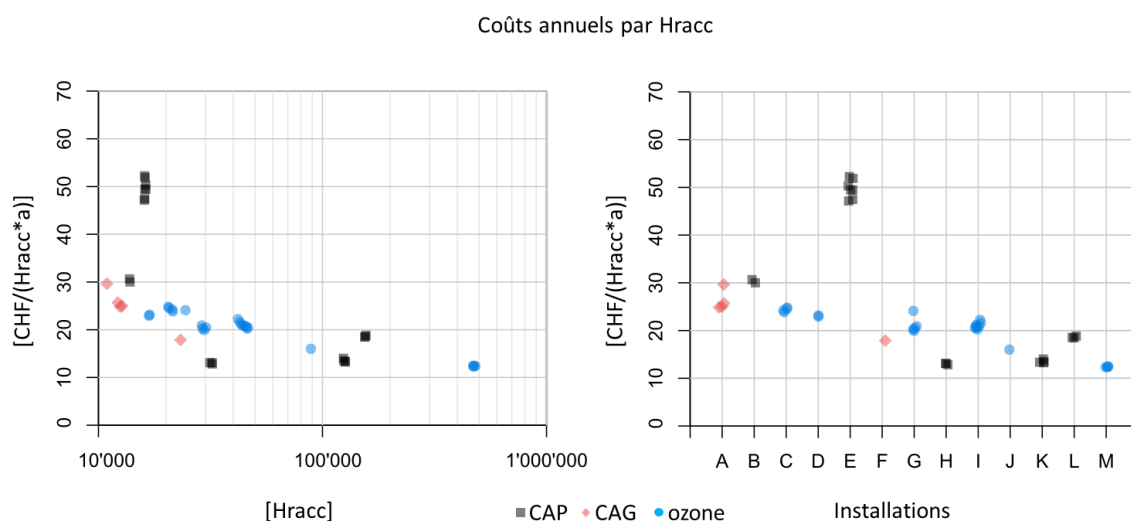


Figure 13: Coûts annuels par Hracc. A gauche : axe des x selon E. A droite : axe des x selon ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Coûts annuels par m³

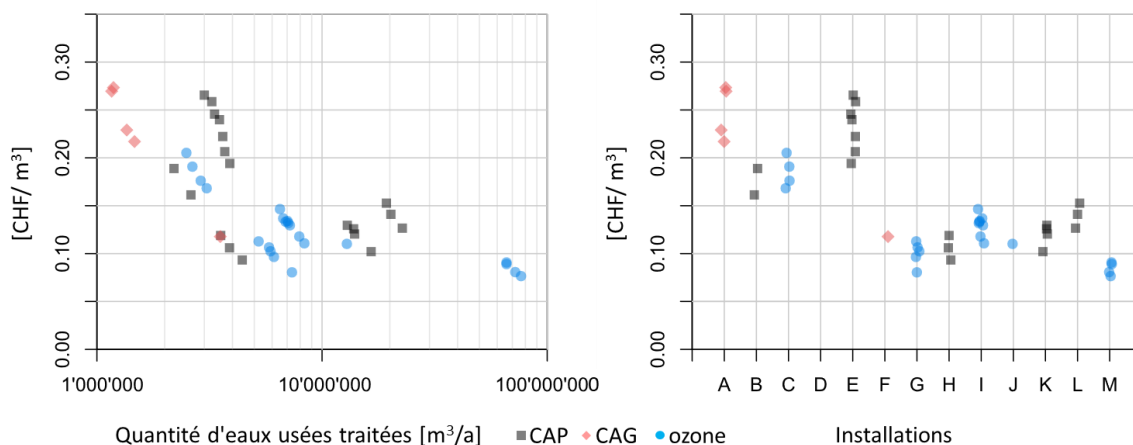


Figure 14 : Coûts annuels par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- Les coûts annuels se situent dans une fourchette d'environ 7 - 32 CHF/EH*a ou 12 - 55 CHF/Hracc *a ou 0,07 - 0,27 CHF/ m³.

Les coûts annuels observés se comparent comme suit aux estimations de l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7] :

- Petits installations de MP :
 - Coûts annuels observés pour les petites installations d'ozone : 0,15 - 0,22 CHF/m³.
 - Coûts annuels estimés pour les petites installations d'ozone (14'000 EH) : 0,32 - 0,36 CHF/m³. [7]
 - Coûts annuels observés pour les petites installations de CAP : 0,10 - 0,26 CHF/m³.
 - Coûts annuels estimés pour les petites installations CAP (14'000 EH) : 0,42 - 0,47 CHF/m³. [7]
 - Pour les petites STEP, les observations ont tendance à se situer en dessous de la fourchette de coûts attendus. Cependant, il n'existe pas encore de données pour les petites installations, notamment celles de 10 000 à 20 000 EH.
- Grandes installations de MP :
 - Coûts annuels observés pour les grandes installations d'ozone : 0,07 - 0,15 CHF/m³.
 - Coûts annuels estimés pour les grandes installations d'ozone (590 000 EH) : 0,09 - 0,11 CHF/m³. [7]
 - Coûts annuels observés pour les grandes installations de CAP : 0,09 - 0,16 CHF/m³.
 - Coûts annuels estimés pour les grandes installations de CAP (590 000 EH) : 0,15 - 0,20 CHF/m³. [7]
 - Pour les grandes STEP, les observations concordent largement avec la fourchette de coûts estimés.
- Contrairement aux coûts d'exploitation, les installations A, B, C et E présentent des coûts annuels relativement élevés. Cela s'explique par les valeurs de remplacement spécifique plus élevées de ces installations.
- Il n'y a pas de différences systématiques entre les installations d'ozone, de CAP ou de CAG.

5.6 Consommation électrique de l'étape principale MP (sans post-traitement)

Définition : Les installations de MP sont divisées en une **étape principale** et un traitement secondaire. L'étape principale est typiquement un réacteur de contact pour l'ozone ou le charbon actif, éventuellement avec une décantation secondaire pour le recyclage des boues de CAP. Les post-traitements associés (voir paragraphe ci-dessous) sont une filtration pour la rétention des CAP ou une étape biologiquement active pour la dégradation des produits de réaction labiles. Une éventuelle station de relevage est attribuée au traitement secondaire.

Consommation électrique MP étape principale par EH

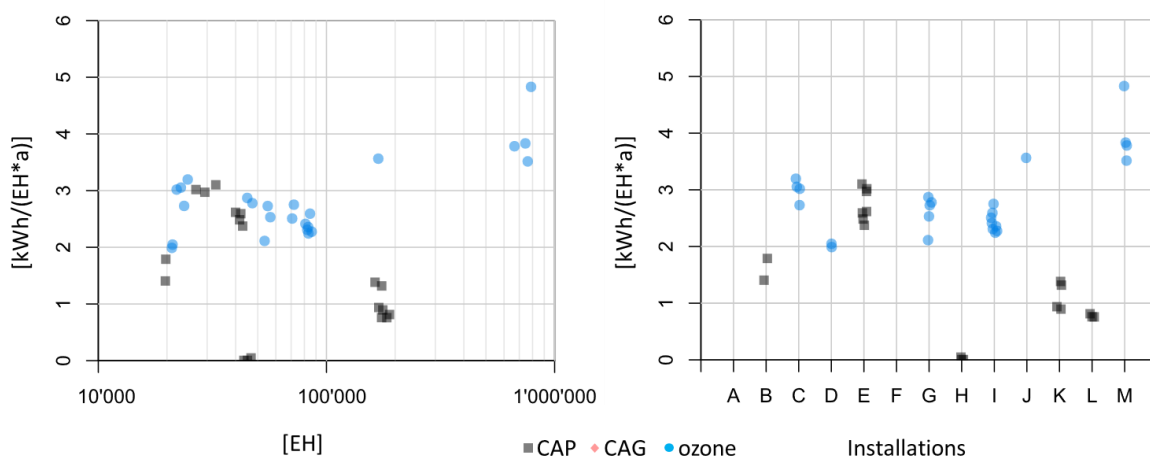


Figure 15: Consommation d'électricité étape principal de MP par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

Consommation électrique MP étape principale par m³

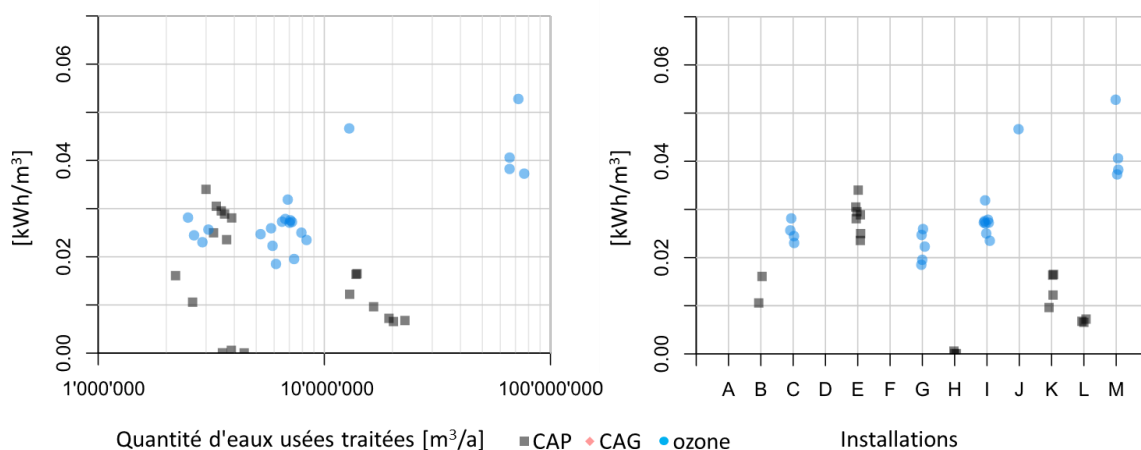


Figure 16: Consommation électrique de l'étape principale de MP par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- La consommation d'électricité des étapes principales des MP se situe entre 0,1 et 5 kWh/EH*a ou 0,001 et 0,055 kWh/ m³.

Les consommations d'électricité observées des étapes principales des MP se comparent comme suit avec les estimations de l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7] :

- Installations d'ozone :
 - Consommation électrique observée des étapes principales des MP : 2 - 5 kWh/EH*a ou 0,02 - 0,055 kWh/ m³.
 - Consommation électrique estimée des étapes principales des MT : 0,05 - 0,1 kWh/m³ [7].
 - Les besoins en électricité des installations d'ozone ont tendance à être surestimés par rapport aux observations actuelles.
- Installations CAP
 - Consommation électrique observée des étapes principales des MP : 0,1 - 3 kWh/EH*a ou 0,001 - 0,035 kWh/ m³.
 - Consommation électrique estimée des étapes principales des MP : 0,01 - 0,04 kWh/m³ pour les dosages de CAP [7].
 - Les observations pour les installations CAP correspondent bien à l'estimation de la consommation d'électricité.
- Liées à la production d'ozone, les installations d'ozone présentent un besoin en électricité plus élevé dans l'étape principale que les procédés CAP. L'installation E constitue à cet égard une exception en raison de la forte proportion d'industries.
- Dans l'installation H, seule la consommation électrique du dosage des CAP dans la biologie est prise en compte pour l'étape principale, conformément à la méthodologie appliquée. La consommation se situe donc à un niveau très bas.
- L'installation M présente une teneur élevée en nitrites en entrée de l'installation d'ozone. On estime que les nitrites représentent environ 10 à 15% des besoins en ozone de cette installation, ce qui entraîne par conséquent une augmentation des besoins en électricité.
- L'installation M exploite en outre sa propre installation de production d'oxygène (PSA). La consommation d'électricité de la PSA n'a pas été prise en compte pour l'étape principale. Ainsi, les consommations d'électricité présentées sont comparables. La consommation d'électricité VPSA est incluse dans le ratio "Consommation d'électricité MP totale" (voir chapitre ci-dessous).
- Les STEP A et F exploitent une installation de CAG. Par définition, la filtration de CAG, y compris le poste de relevage, ne comporte qu'une seule étape de traitement et ne peut donc pas être divisée en deux étapes. Les consommations d'électricité sont présentées aux endroits correspondants dans les chapitres suivants (voir chapitres suivants).

5.7 Consommation électrique du post-traitement MP (sans étape principale)

Définition : L'installation de MP est divisée en une étape principale et un traitement secondaire. L'étape principale est typiquement un réacteur de contact pour l'ozone ou le charbon actif, éventuellement avec une décantation secondaire pour le recyclage des boues de CAP. Les **post-traitements** associés sont une filtration pour la rétention des CAP ou une étape biologiquement active pour la dégradation des produits de réaction. Une éventuelle station de relevage est attribuée au traitement secondaire.

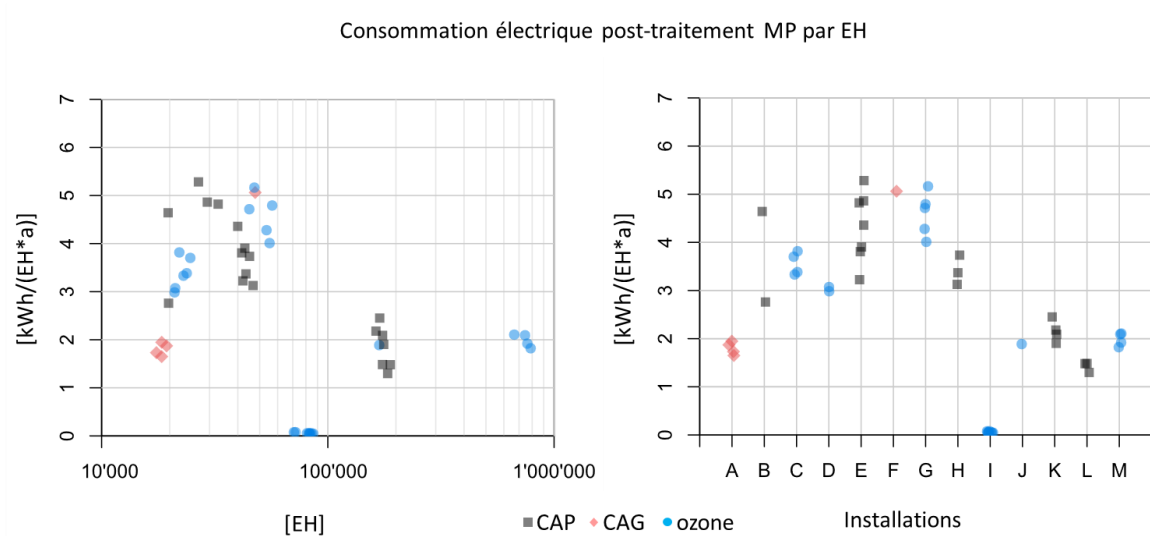


Figure 17: Consommation d'électricité MP Post-traitement par EH. Gauche : axe des x par EH. A droite : axe x selon ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

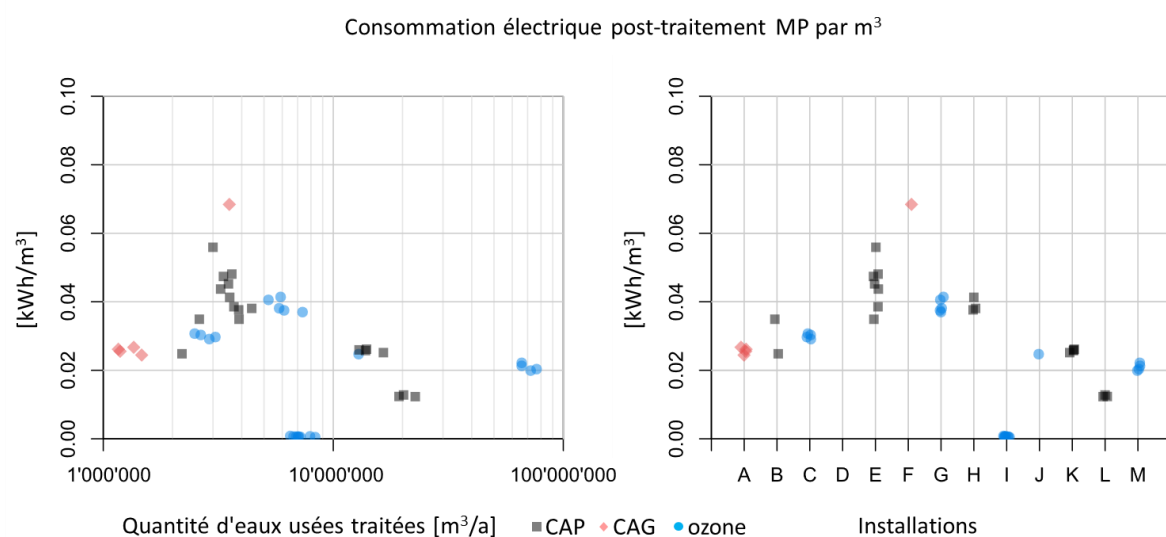


Figure 18 : Consommation électrique du post-traitement MP par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- La consommation d'électricité des post-traitements MP se situe entre 0,1 et 5 kWh/EH*a ou 0,001 et 0,07 kWh/ m³.
- La consommation électrique du post-traitement dépend essentiellement de la hauteur de relevage.
- L'installation I dispose d'une station de relevage avant l'épuration biologique. Après la décantation secondaire, les eaux usées s'écoulent donc gravitairement à travers l'installation de MP. La station de relevage n'est pas affectée à l'étape MP, mais à la biologie. En conséquence, la consommation d'électricité du traitement secondaire est très faible dans l'installation H.
- Les installations A et F exploitent une installation de CAG. Selon la méthodologie, la filtration CAG, y compris la station de relevage, ne comprend qu'une seule étape de traitement. La filtration de CAG est représentée sur ce graphique pour faciliter la comparaison avec les autres installations de filtration ou de traitement secondaire. Les consommations d'électricité présentées dans ce chapitre correspondent donc également à la consommation d'électricité totale des installations de CAG (voir paragraphe suivant).
- L'installation F présente une consommation d'électricité plus élevée que les autres filtrations. Cela s'explique par la circulation continue nécessaire au lit filtrant de CAG.
- Le traitement secondaire étant une filtration pour tous les procédés, aucune différence systématique n'a été constatée entre les procédés.

5.8 Consommation d'électricité MP totale (étape principale et traitement secondaire)

Définition : La consommation totale d'électricité est la somme des consommations d'électricité des étapes principale et secondaire.

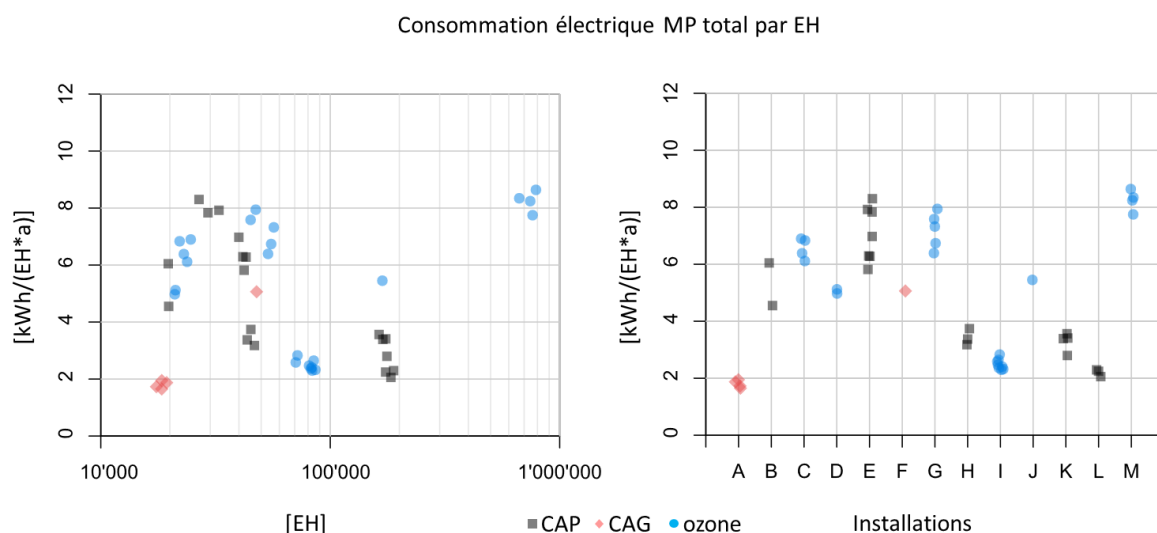


Figure 19: Consommation d'électricité MP Total par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

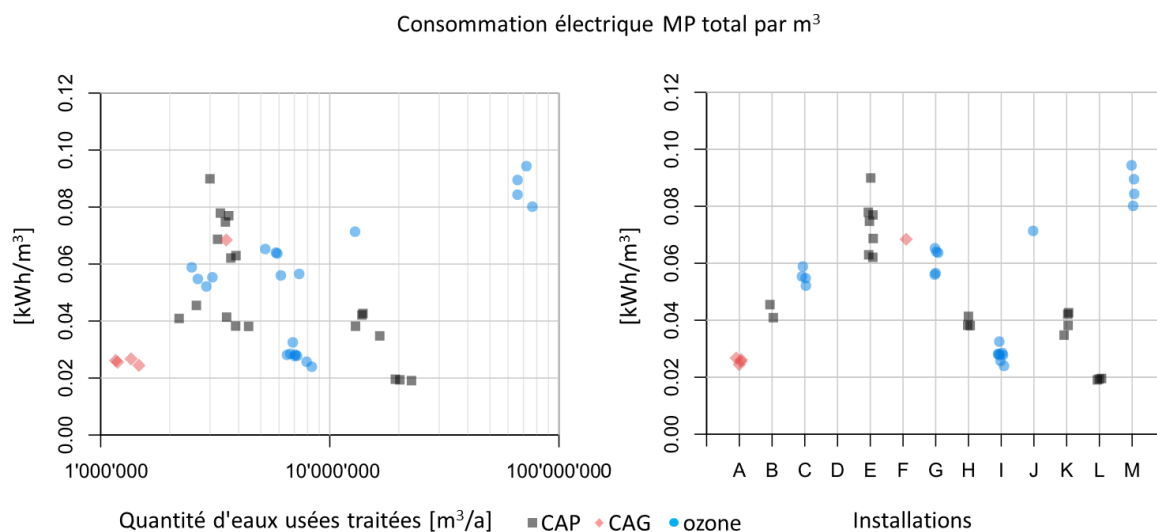


Figure 20: Consommation d'électricité MP Total par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- La consommation totale d'électricité des installations de MP se situe entre 2 - 9 kWh/EH*a ou 0,02 - 0,1 kWh/m³.

Les consommations totales d'électricité observées se comparent comme suit avec les estimations de l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7] :

- Installations d'ozone
 - Consommation totale d'électricité observée : 2 - 9 kWh/EH*a ou 0.02 - 0.10 kWh/m³.
 - Consommation totale d'électricité estimée : 2 - 16 kWh/EH*a ou 0,05 - 0,10 kWh/m³ [7].
 - Les observations correspondent bien avec la consommation totale d'électricité attendue.
- Installations de CAP
 - Consommation totale d'électricité observée : 2 - 9 kWh/EH*a ou 0.02 - 0.10 kWh/m³.
 - Consommation totale d'électricité estimée : 1 - 5 kWh/EH*a ou 0,01 - 0,04 kWh/m³ [7].
 - Les observations correspondent bien avec la consommation totale d'électricité attendue si le "cas spécial" de la STEP E est exclu de l'analyse.
- Installations de CAG
 - Consommation d'électricité observée : 2 - 5 kWh/EH*a ou 0,025 - 0,07 kWh/m³.
 - Il n'existe pas, à ce jour, de valeurs bibliographiques comparables pour les installations de CAG.
- Si l'on exclut les "cas spéciaux" E et I de l'analyse, les installations d'ozone présentent une consommation d'électricité plus élevée que les procédés à charbon actif.
- L'usine M exploite en outre sa propre installation de production d'oxygène (PSA). La consommation d'électricité de la PSA a également été prise en compte pour la consommation totale d'électricité. En conséquence, la consommation d'électricité de l'installation M est plus élevée que celle des autres installations d'ozone.
- La dispersion de la consommation totale d'électricité est importante, tant entre les installations qu'entre les années de fonctionnement.

5.9 Consommation de charbon actif

Définition : La consommation de charbon actif représentée se réfère à la quantité annuelle de CAP ou de CAG dosée (PAS à la quantité livrée).

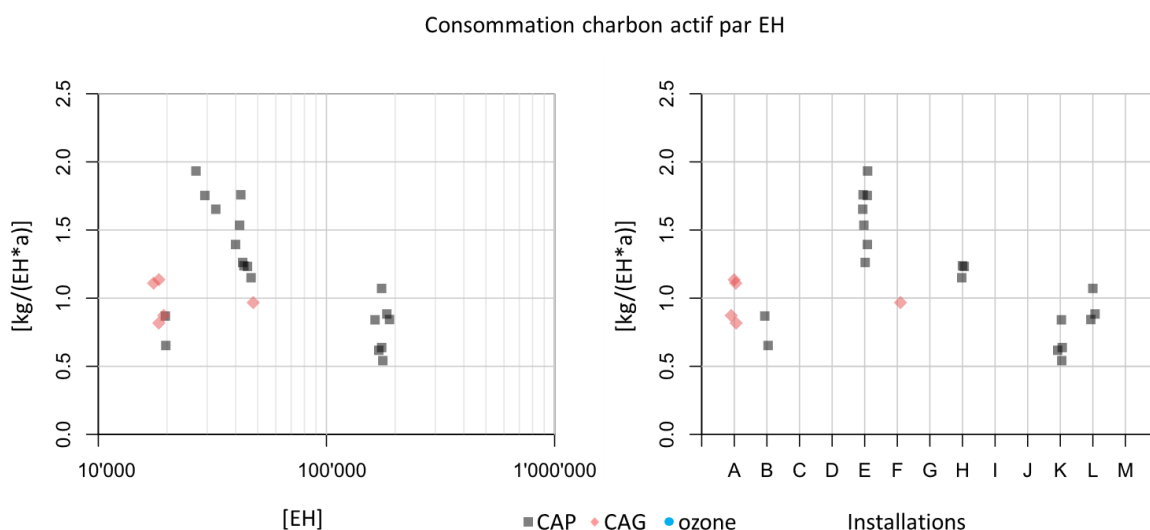


Figure 21: Consommation de CAP par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

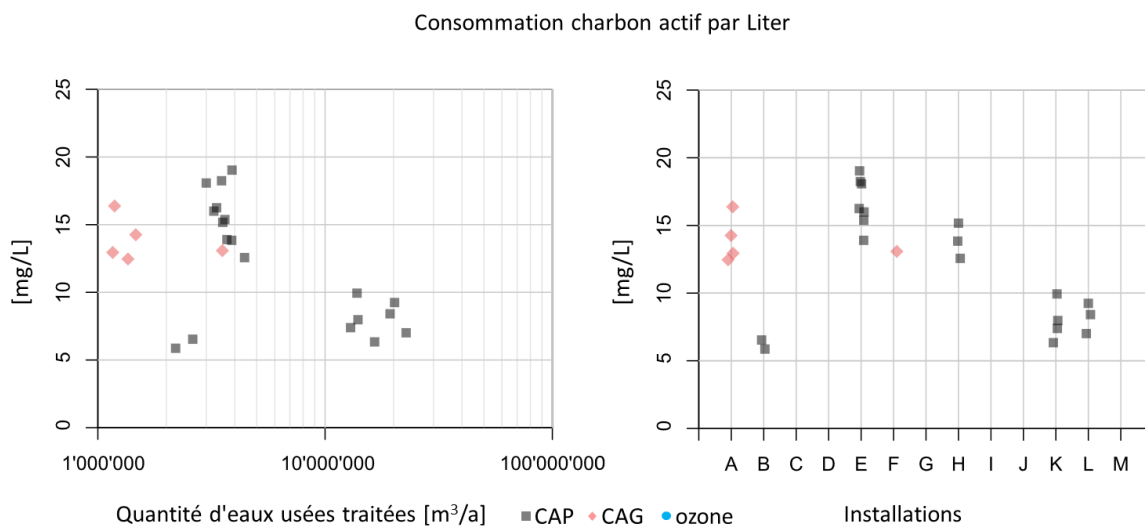


Figure 22: Consommation de CAP par litre d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par litre traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

Observations, interprétations et explications :

- La consommation de charbon actif se situe dans une fourchette d'environ 0,5 - 2 kg/EH*a ou 5 - 20 mg/L.
- Dans l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7], la consommation estimée de charbon actif se situait entre 12 et 15 mg/L. Il apparaît que la capacité d'épuration requise peut être atteinte même avec une dose de charbon actif plus faible que prévu.
- Il n'y a pas de différences systématiques dans la consommation de charbon actif entre les installations de CAP et de CAG.
- La consommation de charbon actif est plus élevée en raison de l'influence de l'industrie sur l'installation E. La consommation spécifique de charbon actif dépend des rejets de l'industrie.
- En raison de la matrice en composés organiques dans le bassin biologique, le besoin en CAP pour l'installation H est plus élevé (dosage des CAP dans la biologie).
- La consommation spécifique de charbon actif dépend des industries raccordées et du procédé choisi.

5.10 Consommation d'oxygène

Définition : La consommation d'oxygène représentée se réfère à la quantité annuelle dosée dans les générateurs d'ozone (PAS à la quantité livrée).

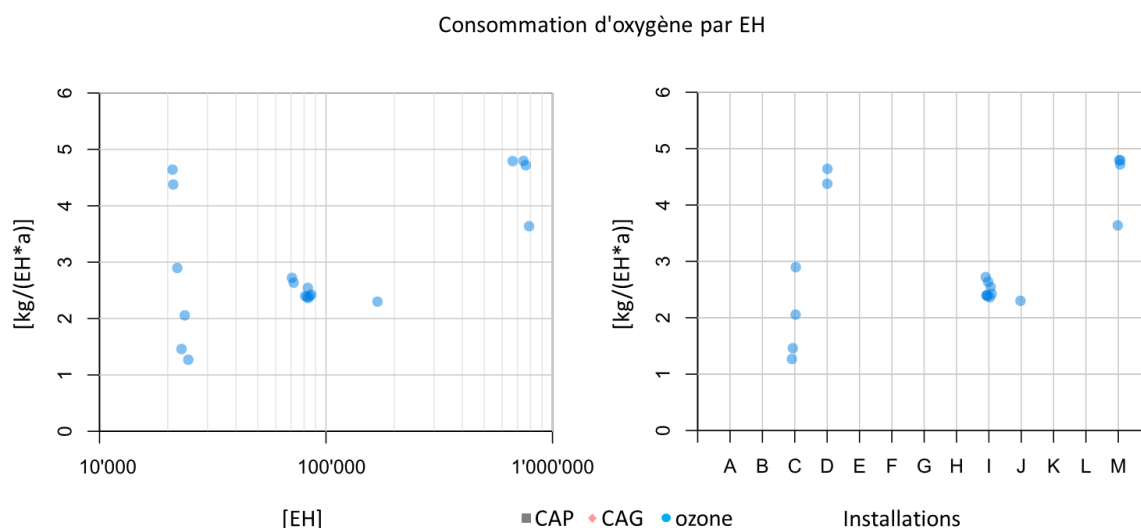


Figure 23: Consommation d'oxygène par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

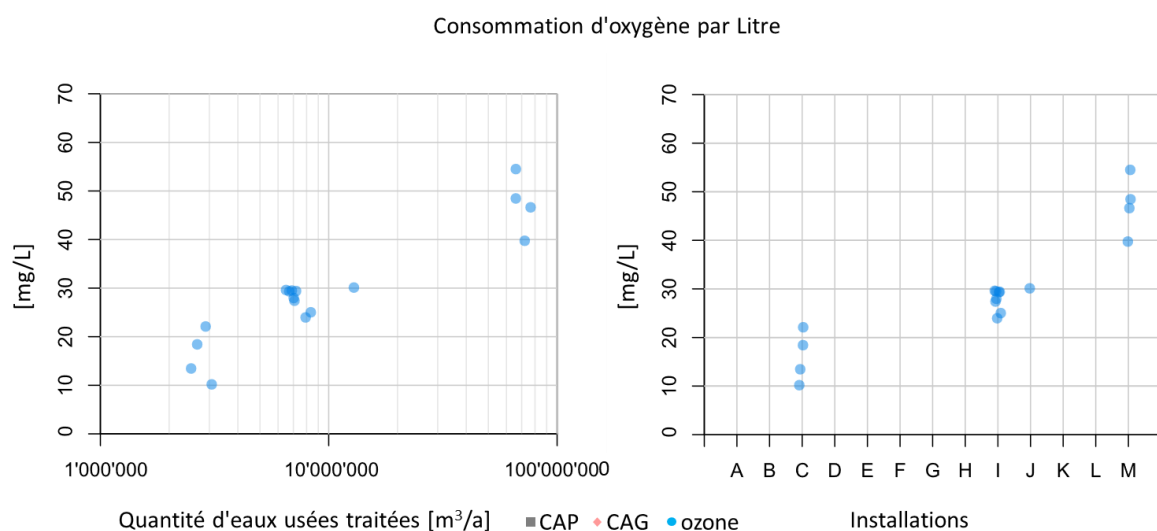


Figure 24: Consommation d'oxygène par litre d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- La consommation d'oxygène se situe entre environ 1 - 5 kg/hab*a ou 10 - 55 mg/L.
- La consommation d'ozone estimée dans l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7] était de 3 - 5 mg O₃/L. En supposant que la proportion d'ozone dans le gaz de traitement soit de 10%, la consommation spécifique d'oxygène attendue est de 30 - 50 mg/L. Les valeurs observées dans cette étude correspondent bien à ces estimations.
- En raison des valeurs élevées de nitrites dans l'alimentation de l'ozonation sur l'installation M, la consommation d'oxygène se situe à un niveau plus élevé (+10-15%). De plus, l'installation PSA fonctionne à pleine charge pour des raisons d'efficacité. En conséquence, davantage de gaz de traitement sont acheminés vers les générateurs d'ozone et les réacteurs (avec une concentration d'ozone plus faible, mais une quantité de gaz de traitement plus élevée).

5.11 Consommation d'énergie primaire

Définition : La consommation d'énergie primaire est constituée de la consommation d'électricité ainsi que des réactifs importés (production + transport). La consommation de ressources liée à la construction des installations n'est pas prise en compte.

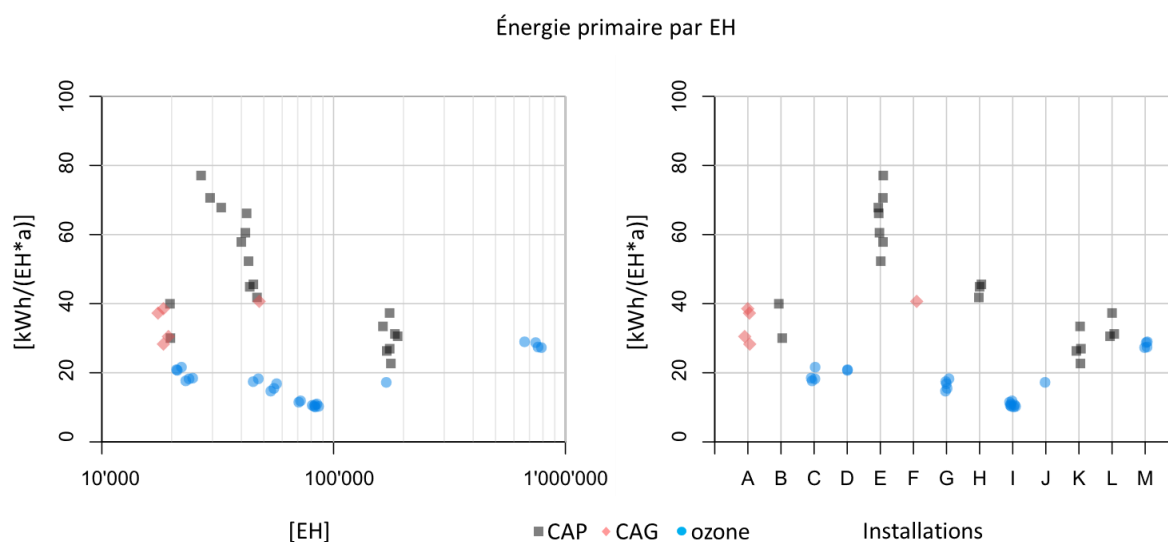


Figure 25: Consommation d'énergie primaire par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année de fonctionnement.

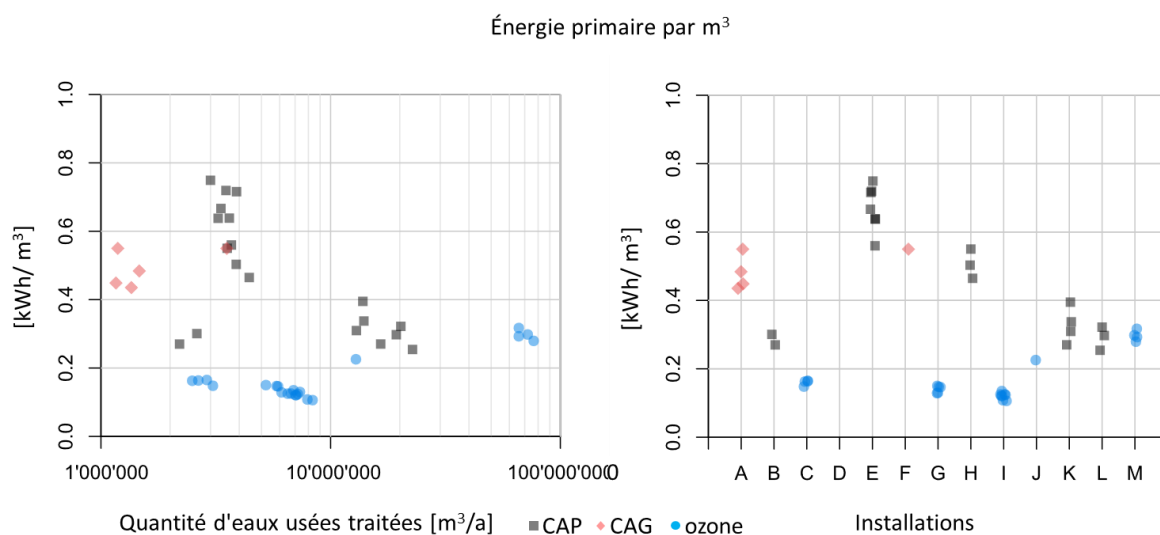


Figure 26: Consommation d'énergie primaire par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- La consommation d'énergie primaire des installations de MP se situe dans une fourchette de 10 à 80 kWh/EH*a ou 0,1 à 0,8 kWh/m³.

Les consommations d'énergie primaire observées se comparent comme suit à l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7] :

- Installations d'ozone
 - Consommation d'énergie primaire observée : 10 - 30 kWh/EH*a ou 0,1 - 0,3 kWh/m³.
 - Consommation moyenne d'énergie primaire estimée : 38 kWh/EH*a ou 0,3 kWh/m³ [7].
- Installations de CAP
 - Consommation d'énergie primaire observée : 22 - 80 kWh/EH*a ou 0,25 - 0,8 kWh/m³.
 - Consommation moyenne d'énergie primaire estimée : 45 kWh/EH*a ou 0,37 kWh/m³ [7].
- Installations de CAG
 - Consommation d'énergie primaire observée : 30 - 40 kWh/EH*a ou 0,4 - 0,6 kWh/m³.
- Les consommations d'énergie primaire des installations sont en grande partie similaires, les unes par rapport aux autres et proches de la "consommation d'électricité MP totale". Cela montre que la consommation d'énergie primaire est principalement déterminée par la consommation électrique des installations.
- En ce qui concerne la consommation d'énergie primaire, on constate que les installations d'ozone, y compris l'installation M, se situent à un niveau similaire. Les effets de l'augmentation de la consommation d'électricité de l'installation M pour la production d'oxygène se compensent avec la consommation d'énergie primaire de production pour l'oxygène liquide dans les autres installations d'ozone. L'installation I constitue une exception en raison de la station de relevage comprise dans la biologie.
- Les installations d'ozone ont tendance à consommer moins d'énergie primaire que les procédés au charbon actif.

5.12 Équivalents CO₂

Définition : Les équivalents CO₂ sont calculés à partir de la consommation d'électricité ainsi que des ressources importées (production + transport). La consommation de ressources liée à la construction des installations n'est pas prise en compte. Pour le charbon actif, deux scénarios ont été pris en compte : production de charbon actif aussi bien à partir de sources de matières premières fossiles que biogènes (voir les légendes des graphiques).

Équivalent CO₂ par EH (charbon fossile)

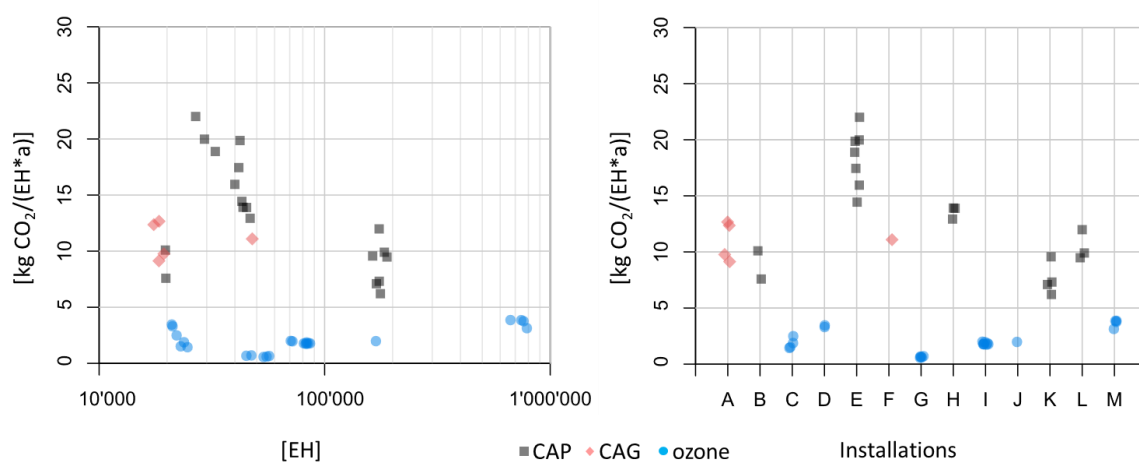


Figure 27: Équivalents CO₂ (charbon fossile) par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Équivalent CO₂ par EH (charbon biogénique)

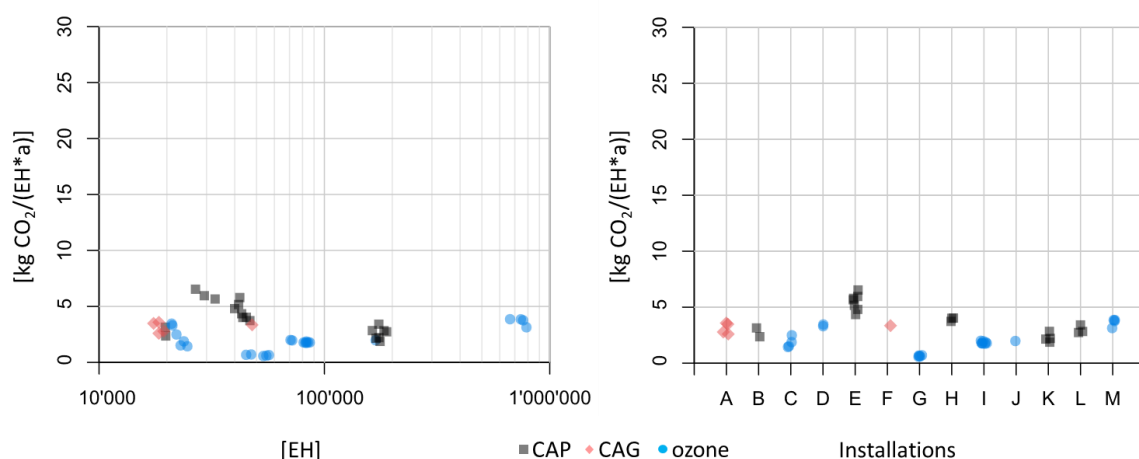


Figure 28: Équivalents CO₂ (charbon biogénique) par EH. Gauche : axe des x par EH. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

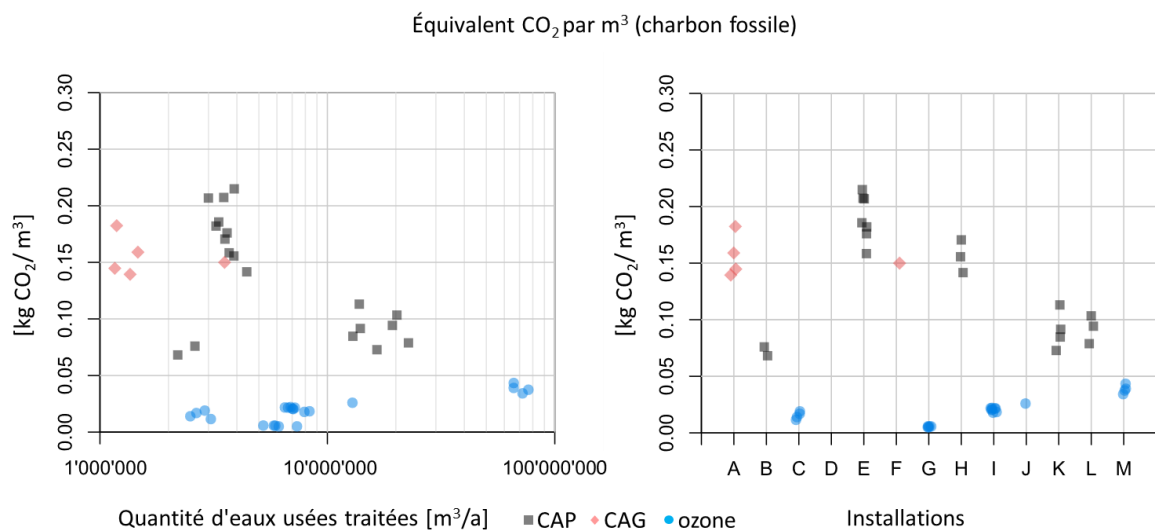


Figure 29: Équivalents CO₂ (charbon fossile) par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

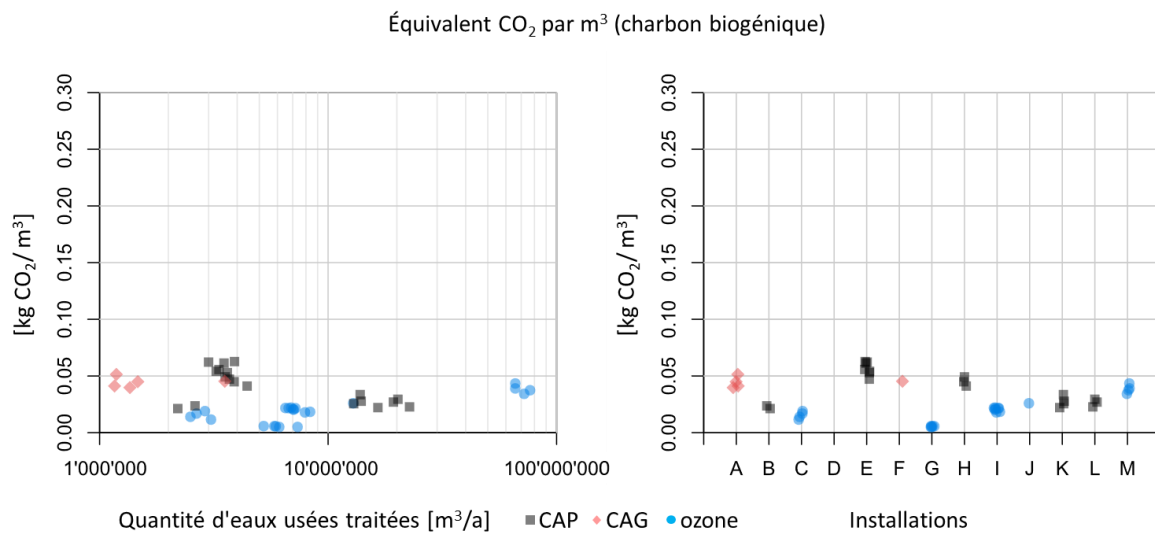


Figure 30: Équivalents CO₂ (charbon biogène) par m³ d'eaux usées traitées. Gauche : axe des x par m³ traité. Droite : axe des x par ID STEP (le déplacement horizontal des points de données sert uniquement à mieux distinguer les différents points et n'a pas d'autre signification). Chaque point de données correspond à une année d'exploitation.

Observations, interprétations et explications :

- Les équivalents CO₂ pour les installations d'ozone se situent dans une fourchette de 1 à 4 kg CO₂ /EH*a ou 0,01 à 0,05 kg CO₂ /m³.
- Les équivalents CO₂ des installations de charbon actif se situent, pour le charbon actif fabriqué à partir de matières premières fossiles, dans une fourchette de 6 à 23 kg CO₂ /EH*a ou 0,06 à 0,23 kg CO₂ /m³.
- Les équivalents CO₂ des installations de MP se situent, pour le charbon actif produit à partir de matières premières biogènes, entre 3 - 7 kg CO₂ /EH*a ou 0.0 - 0.06 kg CO₂ /m³.
- Les installations au charbon actif présentent des équivalents CO₂ nettement plus élevés que les installations à l'ozone lorsqu'elles utilisent du charbon fossile. En cas d'utilisation de charbon issu de sources renouvelables, les équivalents CO₂ des installations à charbon actif se situent dans une fourchette similaire à celle des équivalents CO₂ des installations à d'ozone.
- Les émissions de CO₂ pour la production de charbon actif dépendent fortement de la matière première, de l'activation et du transport. Un facteur moyen a donc été retenu pour le charbon fossile. Selon la matière première utilisée, les équivalents CO₂ peuvent être nettement plus élevés. Une détermination détaillée des facteurs de calcul est disponible dans la recommandation VSA de 2018 [1].

6 Conclusion

6.1 Coûts

- Comparaison des coûts et tendances : sur la base des valeurs de remplacement, on peut constater que : le dosage direct des CAP dans la biologie tend à être avantageux par rapport aux installations d'ozone et aux installations de charbon actif. Il n'y a cependant pas de différences de coûts systématiques entre les installations d'ozone, les installations de CAP et les installations de CAG.
- Dispersion et particularité de chaque STEP : les valeurs de remplacement ainsi que les coûts d'exploitation présentaient une forte dispersion. Chaque STEP ou installation de MP doit être considérée comme un cas particulier. Cela s'explique par les conditions spécifiques telles que la composition des eaux usées, les caractéristiques du sol des fondations, la disposition de l'installation, la gestion des procédés ainsi que l'interconnexion avec le reste des installations de la STEP.
- Prévisions des coûts globaux : il est possible de déduire des valeurs collectées quelques prévisions approximatives des coûts globaux pour l'ensemble de la Suisse. Un plus grand nombre d'installations à disposition permettrait d'améliorer encore la précision de ces prévisions.
- Prévisions pour les cas individuels : il est impossible de faire des prévisions sur les coûts pour une installation en se basant sur les données de cette étude car ceux-ci dépendent beaucoup trop des caractéristiques individuelles.
- Les effets d'échelle : selon les paramètres de normalisation (par EH, par H_{racc} , par Q_{dim}), les valeurs de remplacement se dispersent les unes par rapport aux autres en raison des différentes proportions industrielles. On ne peut donc pas observer d'effets d'échelle évidents.
- Qualité des données : pour les installations existantes, les données relatives aux coûts étaient parfois incomplètes. Les valeurs de remplacement ont dû être estimées dans certains cas. La délimitation des frais de personnel et des frais d'exploitation est également sujette à des imprécisions comptables.

6.2 Consommation électrique

- La consommation d'électricité a tendance à être plus élevée pour le fonctionnement des installations d'ozone que pour les installations de charbon actif.
- La consommation électrique des post-traitements dépend essentiellement de la hauteur de relevage de l'installation de MP. Il n'y a pas de différences systématiques entre les installations d'ozone, de CAP ou de CAG.
- Sur la base de la consommation d'énergie primaire, qui tient compte des réactifs importés, on ne constate pas de différences marquées entre les procédés.
- Il y a des imprécisions dans la saisie des données relatives à l'exploitation. Par exemple, les consommations d'électricité des services auxiliaires, tels que les compresseurs pour les entraînements pneumatiques ou les pompes, n'ont parfois pas pu être prises en compte dans les consommations totales d'électricité.

6.3 Consommation en réactif

- Pour les installations d'ozone, la composition des eaux usées (influencée par l'industrie) et la teneur en nitrites dans l'alimentation de l'installation de MP ont une influence sur la consommation d'oxygène. Cependant, des aspects opérationnels, tels que la gestion des installations PSA, peuvent également entraîner une augmentation de la consommation d'oxygène.

- Pour les installations au charbon actif, la composition des eaux usées (influencée par l'industrie) a notamment une influence sur les besoins en charbon.
- Aucune différence systématique dans la consommation de charbon actif n'a été constatée entre les installations de CAP et de CAG. Jusqu'à présent, il n'existe toutefois que peu de données sur la consommation de charbon actif dans les installations de CAG en Suisse. Une nouvelle comparaison entre les installations de CAP et de CAG dans quelques années est souhaitable.

6.4 Équivalents CO₂

- En termes d'équivalents CO₂, les installations au charbon actif ont une empreinte plus importante que les installations à l'ozone. L'utilisation de produits à base de charbon provenant de matières premières renouvelables et la réactivation du charbon dans les installations de CAG offrent un grand potentiel de réduction des émissions de CO₂ pour ces installations.

6.5 Généralités

- L'ordre de grandeur des chiffres clés calculés correspond bien aux estimations de l'étude d'Abegglen et Siegrist (2012) [7].
- La méthodologie de la saisie des données (recommandation VSA de 2018 [1]) s'est avérée appropriée pour cette étude. Les paramètres de normalisation revêtent une importance différente selon la grandeur d'entrée :
 - Les EH indiquent la charge de l'installation MP. Cette charge est importante pour les coûts d'exploitation ou la consommation des réactifs nécessaires à l'exploitation. Pour les coûts de construction ou la valeur de remplacement, les EH ne jouent qu'un rôle secondaire.
 - Les Hracc sont pertinents en raison de la loi sur la protection des eaux et du financement de l'installation par la Confédération. Pour le dimensionnement ou la charge, les Hracc jouent un rôle secondaire.
 - Q_{dim} est déterminant pour les coûts de construction ou la valeur de remplacement d'une installation de MP car les bassins et les tailles des filtres sont conçus en fonction du temps de séjour hydraulique.

6.6 Perspectives

- En raison de la dispersion relativement importante des données observées, il n'est pas recommandé d'établir des courbes de régression ou des moyennes à partir de ces données. Chaque installation de MP est un cas particulier, conçu pour répondre à des exigences individuelles. Cela signifie qu'il n'est pas possible de déduire de ces données des prévisions pour les installations futures. Les données se prêtent toutefois à une analyse dans le contexte national.
- Seules quelques installations ont été évaluées jusqu'à présent. Dans un avenir proche, quelques nouvelles installations seront mises en service et elles pourront bénéficier des expériences acquises jusqu'à présent. Une nouvelle évaluation dans quelques années avec une comparaison entre les "anciennes" et les "nouvelles" installations est très souhaitable.
- Les indicateurs offrent une base solide pour les comparaisons avec les futures installations et sont très utiles pour suivre les évolutions dans le temps.

Liste des abréviations

STEP	Station d'épuration des eaux usées
CA	Charbon actif
A	Année
D	Jour
Hracc	Habitant raccordé
EMCRG	Électrotechnique, technique de mesure, de commande et de contrôle commande
TEM	Technique électromécanique
EH	Valeur de l'habitant
CAG	Charbon actif granulé
H	Heure
CVCS	Techniques de chauffage, de ventilation, de climatisation et sanitaire
RPC	Rétribution à prix coûtant du courant injecté
MP	Micropolluants
Installation MP	Installation d'élimination des micropolluants
CAP	Charbon actif en poudre
Q_{dim}	Débit d'eau de dimensionnement
VSA	Association suisse des professionnels de la protection des eaux

Annexes

- Fiches descriptives des niveaux de MP étudiés

MV Elimination mit PAK, ARA Esslingen / Egg-Oetwil am See

grosstechnische Umsetzung, in Betrieb seit Sommer 2020

Situation ARA Esslingen:

Belastung Ausbauziel	Einwohnerwerte (EW)
Einwohner	13'700
Industrie	3'300
Total	17'000
Zulauf	
Max. Zulauf bei Trockenwetter	96 l/s
Max. Zulauf bei Regenwetter	200 l/s
Max. Zulauf inkl. Rückläufe	210 l/s



Verfahrenstechnik

Mechanische Stufe	Sandfang, Rechenanlage und Vorklärbecken
Biologische Stufe	Anoxzone, belüftete Zone und Nachklärung
Chemische Stufe	Phosphatfällung (Biologie / vor Filter)
Elimination von Mikroverunreinigungen	PAK vor Sandfilter und PAK in Biologie
Filter	Zweischicht-Sandfilter (Flockungsfiltration)

Ziel und Hintergrund

Die Gewässerschutzverordnung sieht vor, dass unter anderem Anlagen ab 8'000 angeschlossenen Einwohnern, die in ein Fliessgewässer mit einem Anteil von mehr als 10% bezüglich organische Spurenstoffe ungereinigtes Abwasser einleiten, eine Stufe zur Elimination von organischen Spurenstoffen installieren. Aufgrund des Verdünnungsverhältnisses im Vorfluter Mülibach (80% davon gereinigtes Abwasser) erfüllt die ARA Esslingen dieses Kriterium. Die Kläranlagenkommission hat daher im Juni 2018 dem Projekt «Dosierung von Pulveraktivkohle (PAK) vor die bestehende Sandfiltration mit möglicher Rückführung in die Biologie» zugestimmt und den erforderlichen Kredit von CHF 1'680'000 (inkl. MwSt.) bewilligt.

Art des Projektes

Aufgrund der Zusammensetzung des Abwassers wurde ein Reinigungsverfahren mit Pulveraktivkohle gewählt. Eine beim Bau der Filtration ursprünglich gedachte und im Rahmen des Projekts geprüfte Ozonung kam wegen den sehr hohen Frachten an Bromid im Zulauf nicht in Frage. Innerhalb des Projekts wurden insbesondere folgende Massnahmen umgesetzt:

- Installation einer Silo-Anlage zur Lagerung der PAK.
- Neubau eines Technikellers mit den Installationen zur PAK-Dosierung.
- Umbau des bestehenden und vorher noch ungenutzten Reaktionsbeckens (angedacht für eine Ozonung) zu einem Flockungsreaktor: Einbau von Zwischenwänden und Rührwerken.
- Installation von Messtechnik zur Überwachung des PAK-Schlupfs (Trübungsmessung) und zur Regelung der PAK-Dosierung (UV-Absorbanzmessungen).
- Leitungen zu den Dosierstellen der PAK-Suspension (Flockungsreaktor oder Biologie) und Anpassung der Rückführung des Schlammwassers der Filtration (zusätzlich in die Biologie).

Kontakt:

Betreiber:

Zweckverband ARA Egg-Oetwil am See
www.ara-esslingen.ch
 Philipp Oberholzer
 Tel. +41 44 984 17 60

Projektingenieur:

Hunziker Betatech AG
www.hunziker-betatech.ch
 Andreas Büeler
 Tel. +41 52 234 50 50

Dimensionierungsgrundlagen und Technologien

Parameter	Einheit	Wert
max. Zulauf PAK-Flockungsreaktor und Filter	l/s	210
min. Kontaktzeit im Flockungsreaktor	min	19
Max. Filtergeschwindigkeit bei n = 4 Zellen / bei n-1 = 3 Zellen	m/h	12.4 / 16.6
Dosierung PAK	mgPAK/l	ca. 10 (Bereich von 5 bis 20 möglich)
Dosierung FeCl ₃ (Nachfällung)	mgFe/l	ca. 1.0
Rückführung PAK-Überschussschlamm	In die Biologie (Normalfall) oder in den Sandfang	
PAK-Typ	Donau Carbon, Carbopal AP (bei IBS), ab Februar 2021 CSC, Pharma Clean	

Kurzbeschreibung

Die PAK wird trocken in einem Silo gelagert. Über eine Dosiereinrichtung wird sie benetzt, in Brauchwasser eingemischt und dann als Suspension in den Flockungsreaktor dosiert. Die PAK wird in der Zweischicht-Sandfiltration vom Abwasser abgetrennt (d.h. bis zur nächsten Rückspülung zur Spurenstoffadsorption «eingelagert») und gelangt anschliessend über das Filterrückspülwasser (Schlammwasser) in die Biologie. Dort wird sie über den Überschussschlamm und letztlich mit dem Klärschlamm ausgeschieden. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit PAK direkt in die Belebungsbecken zu dosieren («Direktdosierung» in die Biologie).

Verfahrensschema

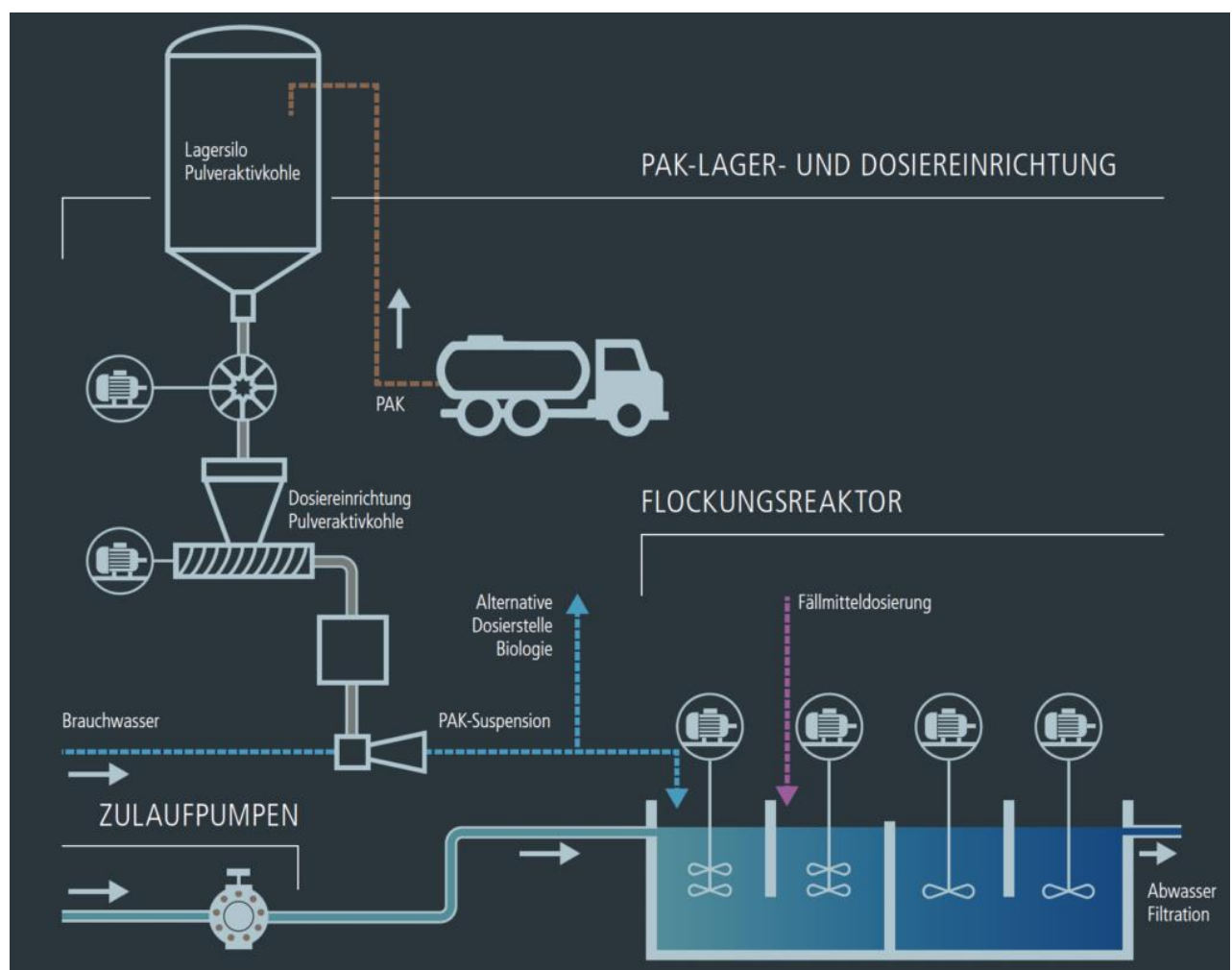


Abbildung 1: Verfahrensschema der Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen auf der ARA Esslingen

Ozonung ARA Eich, Bassersdorf

grosstechnische Umsetzung, in Betrieb seit Juni 2018

Situation ARA Bassersdorf:

Belastung Ausbauziel	Einwohnerwerte (EW)
Einwohner	23'000
Industrie	5'000
Total	28'000

Zulauf

Trockenwetter	125 l/s
Max. Zulauf bei Regenwetter	250 l/s

Verfahrenstechnik

Mechanische Stufe	Grob- und Feinrechen, Sandfang, Vorklärung
Biologische Stufe	Biologie (Nitrifikation, Denitrifikation), Nachklärung
Chemische Stufe	Phosphatfällung (Zugabe Aluminiumsalze in Zulauf Biologie)
Elimination von Mikroverunreinigungen	Ozonung
Filter	Nachgeschaltete 1-Schicht-Filtration



Ziel und Hintergrund

Die Änderung der Gewässerschutzverordnung (in Kraft seit 1. Januar 2016) sieht vor, dass unter anderem Anlagen ab 8'000 angeschlossenen Einwohnern, die in ein Fließgewässer mit einem Anteil von mehr als 10% bezüglich organische Spurenstoffe ungereinigtem Abwasser einleiten, eine Stufe zur Elimination von organischen Spurenstoffen installieren. Dies betrifft die ARA Bassersdorf mit heute rund 19'000 angeschlossenen Einwohner und dem Vorfluter Dietliker Altbach (kumulativer Abwasseranteil im Gewässer 75%). Gemäss der Planung des Kantons Zürich soll die ARA Bassersdorf bis 2025 ausgebaut sein. Da die ARA in naher Zukunft ihre Kapazitätsgrenze erreichen wird, hat sich der Gemeindeverband für eine rasche Umsetzung entschlossen. Die Delegierten haben dem Kredit von rund 14.4 Mio. Franken im Sommer 2015 zugestimmt. Der Spatenstich erfolgte am 21. März 2016. Rund 75% der Erstinvestitionen wurden durch den für diese Ausbauten eingerichtete Bundesfonds gedeckt.

Art des Projektes

Auf der ARA Bassersdorf wurde der Biologie eine Ozonung mit einem Ozonreaktor (250 m³), und 4 Filterzellen (1.5 m Filterbetthöhe) nachgeschaltet. Der Flüssigsauerstoff wird in einem Tank (20 m³) gelagert. Es handelt sich um eine Vollstromanlage.

Kontakt:

Betreiber:

Zweckverband ARA Bassersdorf
Michael Nauer, Aktuar:
044 838 85 25

Patrick Sonderegger
Klärmeister
044 836 74 73

Projektingenieur:

Simone Bützer, Hunziker
Betatech AG, Zürich
043 344 32 85

Bauherrenberatung:

Bernhard Buchli
TBF + Partner AG
043 255 23 61

Dimensionierungsgrundlagen und Technologien

Parameter	Einheit	Wert
max. Zulauf Ozonung	l/s	250
max. Ozondosierung bei $Q_{TW, max}$	gO_3/m^3	1.7
Spezifische Ozondosierung	$mgO_3/mgDOC$	0.35
Ozonproduktion (bei 10% und Kühlwasser-Temperatur 20 °C)	kg/h	4.2
Aufenthaltszeit im Ozonreaktor bei Q_{max}	min	16.6
Aufenthaltszeit im Ozonreaktor bei Q_{TW}	min	33
Volumen Ozonreaktor	m^3	250
Wassertiefe	m	7
Anzahl Begasungskammer	-	2
Anzahl Filterzellen	-	4
max. Filtergeschwindigkeit	m/h	15
max. Zulauf Filter	l/s	250

Kurzbeschreibung

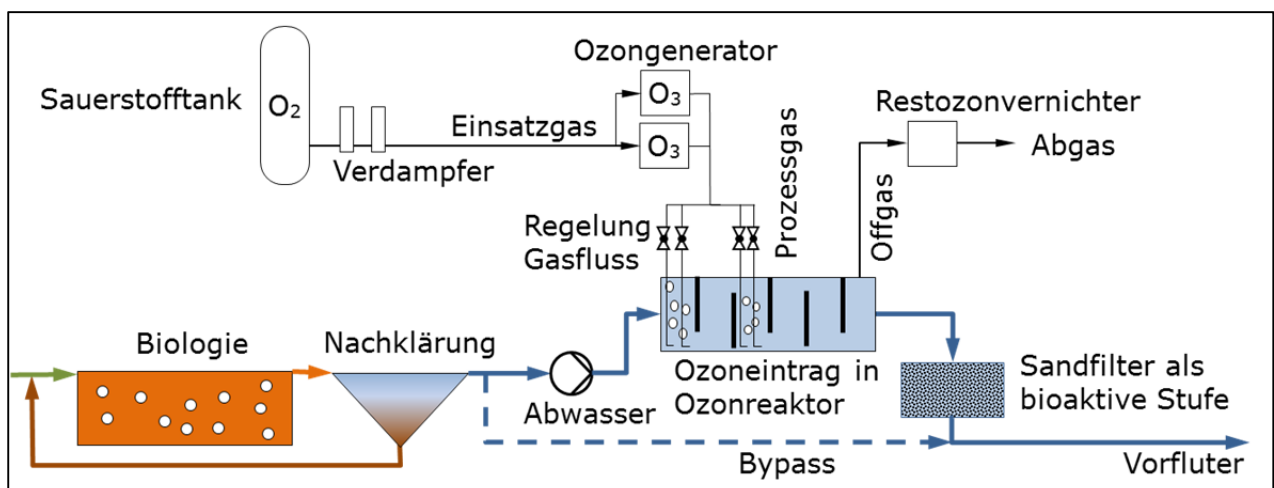
Es handelt sich um eine einstrassige Vollstrom-Anlage mit einer nachgeschalteten Einschiebfiltration (1.5 m Quarzsand). Der Kontaktreaktor wird längs durchflossen und besteht aus 6 Kammern, davon zwei Begasungskammern. Die Diffusoren sind jeweils in 2 Feldern angeordnet.

Zur Sicherheit und Anlagenüberwachung sind folgende Messungen installiert:

- Raumluftüberwachung mit Alarmierung und Sturmlüftung im Notfall
- Restozonmessung im Off-Gas
- Ozonmessung in der Gasphase des Ozonreaktors
- Schutzausrüstung für O3 vorhanden (Schutzmaske, Gaswarngerät)

Schema

Abbildung 1:



Ozonation à la STEP de Porrentruy

Situation STEP de Porrentruy

Charge	Equivalent Habitant (EH)
Habitants	20'000
Industrie	5'000
Total	25'000
Débit	
Temps sec moyen	110 l/s
Débit max en temps de pluie	500 l/s
Procédés de traitement	
Traitement mécanique	Dégrilleur grossier et fin, dessableur aéré, déshuileur, décanteur primaire
Traitement biologique	Bassins de boues activées, décanteurs secondaires
Traitement chimique	Précipitation simultanée



Contexte

Suite à la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) au 1^{er} janvier 2016, le Canton du Jura a proposé une planification selon laquelle la STEP de Porrentruy, avec ses 17'000 habitants raccordés et son rejet d'eau épurée représentant plus de 10% du débit de l'Allaine, figure parmi les stations devant s'équiper.

Type de projet

Un traitement des micropolluants par ozonation et filtration sur sable a été réalisé pour un coût total de 4,5 millions de CHF. L'étude du projet de construction de la station de traitement des micropolluants et les demandes d'autorisations se sont déroulées de 2015 à 2018, les travaux ont été réalisés de novembre 2018 à octobre 2020. Réalisée conformément aux plans et dans le respect du budget, la nouvelle installation permet d'abattre plus de 80% des micropolluants indicateurs avec un fonctionnement stable et régulé.

Contacts:

Exploitant

Station d'épuration de
Porrentruy et environs
(SEPE)

info@sepe-porrentruy.ch

Ingénieur:

RWB Groupe SA

Jonas Margot

Daniel Urfer

jonas.margot@rwb.ch

058 220 39 07

Fournisseur :

Wabag Wassertechnik

Dimensionnement et technique de traitement

	unité	valeur
Débit max de l'étape de traitement des micropolluants	l/s	300
Quantité d'ozone dosée maximale	gO ₃ /gCOD	0.75
Nombre de générateurs d'ozone	-	1
Production maximale d'ozone par générateur	kgO ₃ /h	4.2
Volume du réacteur de contact	m ³	167
Profondeur d'eau dans la chambre d'injection	m	5.7
Nombre de compartiments d'injection d'ozone	-	1
Durée de rétention dans le réacteur au débit maximal	min	9.3
Durée de rétention dans le réacteur par Q _{TS} moyen	min	25
Vitesse de filtration au débit maximal (n-1 filtres)	m/h	13.3
Temps de contact par débit moyen	min	15

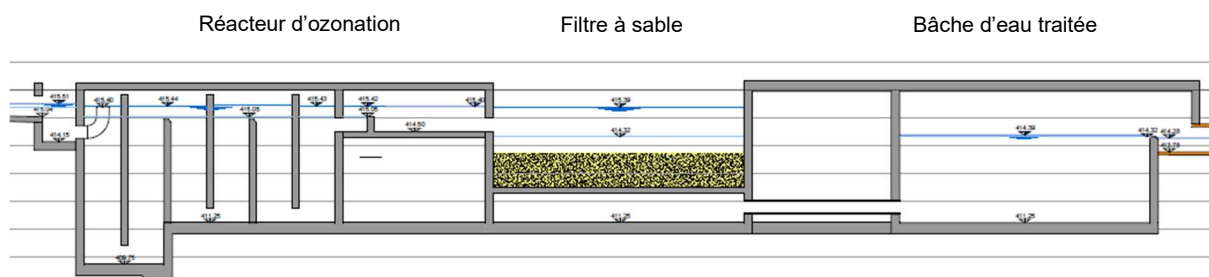
Description de l'installation

L'ozone est généré sur place à partir d'oxygène liquide. Celui-ci est stocké dans une citerne cryogénique de 11.5 m³ et acheminé sous forme gazeuse grâce à deux évaporateurs. A partir de l'oxygène gazeux, un gaz ozoné (7-14% d'ozone) est produit par un générateur d'ozone d'une capacité de 4.2 kg O₃/h. Le générateur d'ozone est refroidi par échangeur de chaleur dans les eaux traitées. L'élimination des micropolluants est effectuée dans un réacteur de contact comprenant 3 chambres, c'est-à-dire 6 compartiments. L'ozone est injectée à contre-courant dans la première chambre à l'aide de dômes. Les eaux ozonées sont filtrées sur quatre lignes de filtres à sable monocouches (1.25 m de média filtrant (anthracite, Ø = 1.6-2.5 mm). L'objectif de la filtration sur sable est d'obtenir une activité biologique pour la dégradation des produits d'oxydation potentiellement toxiques, ainsi que la rétention des matières en suspension (MES).

L'installation est équipée d'un système d'alarme optique et sonore pour avertir l'exploitant en cas de fuite d'ozone ou d'oxygène dans les locaux. La détection d'une fuite arrête automatiquement la production d'ozone et enclenche la ventilation pour garantir la sécurité des exploitants. Les gaz viciés (>90% d'oxygène avec des traces d'ozone) sont récupérés à la surface du réacteur et traités par un destructeur d'ozone thermo-catalytique.

L'installation traite les micropolluants conformément à la législation depuis septembre 2020. Des tests de performances ont été réalisés d'octobre 2020 à septembre 2021 afin d'optimiser le fonctionnement et le dosage d'ozone. Selon le choix de l'opérateur de la STEP, l'ozone peut être dosé en fonction de (i) débit d'eau, (ii) absorbance UV254nm dans les eaux en entrée du réacteur, (iii) différence d'absorbance UV254nm dans les eaux entre l'entrée et la sortie du réacteur, et (iv) concentration d'ozone dissous résiduel en fin de réacteur. Les premiers résultats de fonctionnement montrent une bonne élimination des micropolluants dans différentes conditions de traitement.

Schéma



Auftraggeber

Gemeinde Herisau

Objekt

ARA Bachwis: PAK-Stufe

Kosten

Gesamtkosten CHF 4.6 Mio.

zeitlicher Ablauf

Bauprojekt 07.2013

Realisierung 08.2013-05.2015

Inbetriebnahme 06.2015

Projektleitung

KUSTER + HAGER

Ingenieurbüro AG St. Gallen

Oberstrasse 222

9014 St. Gallen

**Kurzbeschreibung / Kennzahlen**

Grösse ARA 34'000 EW

 $Q_{\max}$ 300 l/s

Biologie Attisholz-Verfahren

PAK-Stufe Ulmer Verfahren

Die PAK-Stufe ist eine zweistrassige Anlage nach dem "Ulmer Verfahren".

Dabei wird die Pulveraktivkohle in Reaktionsbecken mit mindestens 30 Minuten Kontaktzeit zudosiert und in einer nachfolgenden Sedimentationsstufe vom Abwasserstrom abgetrennt.

Anschliessend wird der Ablauf der PAK-Stufe über den bestehenden Sandfilter geführt.

Die Anlage ist auf $Q_{\max} = 170$ l/s dimensioniert und entspricht so einer Teilstrombehandlung. Damit werden im Durchschnitt ca. 90% der gesamten Jahresabwassermenge der ARA Herisau behandelt.

Die Überschussskohle aus der PAK-Stufe wird in die 2. Stufe der biologischen Reinigung der ARA Herisau zurückgeführt. Dort wirkt die PAK zusätzlich bezüglich Elimination von DOC und Mikroverunreinigungen, bevor sie zusammen mit dem biologischen Überschussschlamm der Schlammverwertung zugeführt wird.

Bei einer Dosierung von 20 mg/l PAK erreicht die PAK-Stufe eine Entnahme von grösstenteils weit über 80% bzgl. Mikroverunreinigungen und eine sehr gute Elimination der aus industriellem Abwasser stammenden Schaum- und Farbprobleme sowie refraktärem DOC.

Besonderheiten

- Neubau einer Stufe zur Elimination von Mikroverunreinigungen mittels Pulveraktivkohle (PAK)
 - Integration in bestehende Anlage zwischen Biologie und Filtration ohne zusätzliches Hebewerk
 - Anspruchsvoller Baugrund in Hanglage
 - Problematisches Textilabwasser
 - Sehr kleiner und sensibler Vorfluter
- Sehr hohe Anforderungen an Entfärbung, Entschäumung und DOC-Elimination



Zweistufige Biologie der ARA Herisau



Sedimentationsbecken PAK-Stufe (links Filter)

Unsere Leistungen als Planer

- Gesamte Planerleistungen bis und mit Abnahme
- Betriebsbegleitung Juni 2015 – Ende 2017



Reaktionsbecken der PAK-Stufe mit PAK-Silo

Auftraggeber

Abwasserverband Aachtal, Hefenhofen

Objekt

Elimination von Mikroverunreinigungen

Kosten

Gesamtkosten CHF 1.99 Mio.

Zeitlicher Ablauf

Bauprojekt 2018

Realisierung 2018 – 2021

Inbetriebnahme 2021

Projektleitung

KUSTER + HAGER

Ingenieurbüro AG St. Gallen

Oberstrasse 222

9014 St. Gallen



Kurzbeschreibung / Kennzahlen

Grösse der ARA 41'700 EW

Trockenwetter: 150 l/s

Die ARA Moos bei Amriswil reinigt die Abwasser von insgesamt 9 Gemeinden und verfügt über eine bestehende Filtration im System DynaSand.

Mit der Umnutzung der bestehenden Sandfiltration in eine Filtration mit GAK müssen keine neuen Becken gebaut werden. Das Verfahren schneidet daher bei der Wirtschaftlichkeit sehr gut ab und ist für den ARA-Betrieb mit verhältnismässig geringem Aufwand verbunden.

Mit dem Umbau der ersten Filtereinheit ist die ARA Moos die schweizweit erste Kläranlage mit einer GAK-Filtration im System DynaSand.

Dem erfolgreichen einjährigen Versuchsbetrieb (bis Anfang 2020) in einem der insgesamt 4 Filterbecken folgt der Ausbau der gesamten Filtration in eine GAK-Filtration.

Besonderheiten

- 1. GAK Filtration auf ARA in der Schweiz im System DynaSand
- Separate Beschickung der einzelnen Filterzellen für einen gestaffelten und parallelen Filtrationsbetrieb



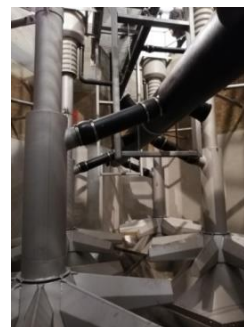
ARA Gelände mit Filtrationsgebäude im Hintergrund



Filtereinheit "DynaSand" ohne Filtermaterial

Unsere Leistungen als Planer

- Variantenstudie
- Planung, Durchführung und Auswertung Pilotversuch
- Bau- und Ausführungsprojekt
- Bewilligungsverfahren
- Bauleitung



Innenansicht des Filters vor der Befüllung

ANLAGESTECKBRIEF - August 2017

Ozonung auf der ARA Reinach, Abwasserverband Oberwynental

Situation ARA Reinach:

Belastung	Einwohnerwerte (EW)
Einwohner	30'000
Industrie	15'000
Kapazitätsreserve	15'000
Total	60'000
Zulauf	
Trockenwetter	240 l/s
Max. Zulauf bei Regenwetter	410 l/s

Verfahrenstechnik

Mechanische Stufe	Rechen, Sandfang, Vorklärung
Biologische Stufe	Belebtschlamm-Anlage mit Nitrifikation und Denitrifikation
Chemische Stufe	Phosphatfällung
Filtration	Sandfilter (1-Schicht-Filter)



Ziele und Hintergrund

Die Kläranlage Reinach des Abwasserverbandes Oberwynental wurde 2015 erneuert und auf zirka 60'000 EW ausgebaut. Da die Kläranlage den Vorfluter Wyna mit einem ungünstigen Verdünnungsverhältnis belastet, wurde im Rahmen des Ausbauprojekts eine Ozonung mit nachgeschalteter Raumfiltration realisiert.

Die Anlage wurde termingerecht im Herbst 2016 in Betrieb genommen. Es handelt sich somit um die zweite Anlage zur Elimination von Mikroverunreinigungen in der Schweiz auf der Basis einer Ozonung.

Art des Projektes

Aus dem durchgeführten Variantenstudium zur Evaluation des geeigneten Verfahrens resultierte, dass für die ARA Reinach die Ozonung mit Anlieferung von Reinsauerstoff, d.h. ohne eigene Anlage zur Reinsauerstoffherstellung, die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Mit den anschliessend durchgeführten Laborversuchen wurde gezeigt, dass die Mikroverunreinigungen mit Ozon ausreichend oxidiert werden können, ohne dass toxische Nebenprodukte wie Bromat in relevanten Konzentrationen gebildet werden.

Projektbeteiligte:

Betreiber:
 Abwasserverband
 Oberwynental
 062 771 37 03
 (Kläranlage Reinach)

Gesamtplanung:
 Holinger AG, Baden

Bauherrenberatung:
 Kappeler Concept AG,
 Chur

Ozonung und Filtration:
 WABAG Wassertechnik AG,
 Winterthur

Dimensionierungsgrundlagen

	Einheit	Wert
Max. Abwassermenge durch MV-Stufe (inkl. Rückläufe)	l/s	425
Max. Ozondosierung bei $Q_{TW,max}$ (240 l/s)	mgO ₃ /m ³	6
Ozonproduktion (bei 10% und Kühlwasser-Temperatur 20 °C)	kg/h	2 x 2.6
Volumen Kontaktreaktor	m ³	2 x 180
Wassertiefe	m	6
Anzahl Begasungskammer	-	2
Aufenthaltszeit im Reaktor bei Q_{max}	Min	14
Aufenthaltszeit im Reaktor bei $Q_{TW,max}$	Min	25
Anzahl Filterzellen	-	5
Fläche pro Filterzelle	m ²	22.5

Kurzbeschreibung

Es handelt sich um eine zweistrassige Vollstrom-Anlage mit einer nachgeschalteten Einschiebfiltration. Die beiden Kontaktreaktoren werden längs durchflossen. Jeder Reaktor besteht aus zwei Begasungskammern, wobei die erste Kammer 17 Diffusoren und die zweite Kammer 7 Diffusoren enthält. Die Diffusoren sind jeweils in 2 Feldern angeordnet. Das Ozon wird in ca. 6 m Tiefe eingetragen. Die Reaktoren werden mit je 50% des Durchflusses beschickt. Der Sauerstoff für die Ozonproduktion wird flüssig angeliefert.

Zur Sicherheit und Anlagenüberwachung sind folgende Messungen installiert:

- Raumluftüberwachung in redundanter Ausführung (2 Messgeräte) mit je 2 Sensoren für Sauerstoff und Ozon
- Restozonmessung im off-gas (bei zu viel Ozon wird die Ozonung gedrosselt)
- Ozonmessung in der Gasphase im Verteilkanal nach der Ozonung (bei Überschreitung der Stufe 1 wird Natrium-Bisulfit dosiert und bei Überschreitung der Stufe 2 wird der Generator abgestellt und weiter Natrium-Bisulfit dosiert).

Technologien:

- Ozonerzeugung: Typ OZONIA CFV-04
- Filtration: WABAG Raumfiltration

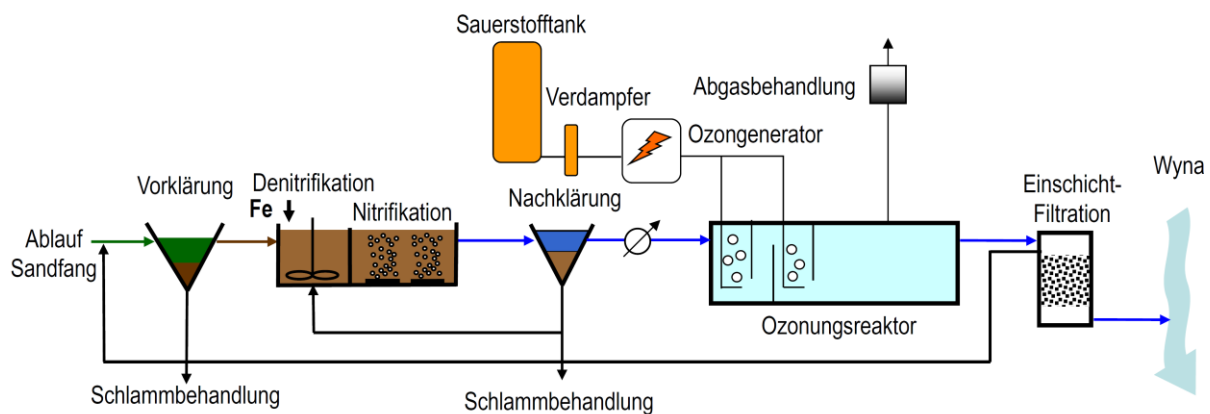


Abbildung 1: Fließschema ARA Reinach

Reinigungsleistung

Die geforderte Reinigungsleistung von 80 % kann mit der Anlage gut erreicht werden.

Betriebserfahrungen und Erkenntnisse

Anfänglich wurde das Ozon mengenproportional mit einer Plafonierung bei $Q_{TW,max}$ dosiert (5 g O_3/m^3 bei einer DOC-Konzentration von gut 7 g/ m^3 ergibt eine spezifische Dosierung von etwa 0.7 g O_3/g DOC). Zurzeit wird die Steuerung und Regelung der Ozondosierung über SAK-Sonden in Betrieb genommen, was eine Optimierung des Ozoneintrages erlauben wird.

PAK-Direktdosierung ARA Flos Wetzikon

grosstechnische Umsetzung, in Betrieb seit Februar 2019

Situation PAK-Dosieranlage ARA Flos:

Ausbaugrösse

Einwohner (2018)	31'266
Einwohnergleichwerte (EWG)	37'000

Zulauf

Trockenwetter Mittelwert	100 l/s
Max. Zulauf bei Regenwetter (bestehend, vor Ausbau ARA)	450 l/s

Verfahrenstechnik

Mechanische Stufe	Rechen, Sandfang, Vorklärung
Biologische Stufe	Belebtschlammanlage mit Tiefenbelüftung und Nitrifikation, A/I, Denitrifikation
Chemische Stufe	Phosphatfällung



Anlagenbeschreibung

Auf der ARA Wetzikon wird Pulveraktivkohle in die 2-strassige Belebtschlamm-Biologie dosiert. Die PAK wird in der Nachbelüftungszone zugegeben, da dort der DOC bereits sehr niedrig ist (Schema siehe Abbildung 1, Dosierort Abbildung 2). Die PAK gelangt mit der internen Rezirkulation zusammen mit dem Rücklaufschlamm in den vorderen Teil der Belebungsbecken. Dadurch wird die Aufenthaltszeit der PAK in der Biologie erhöht. Die PAK wird in einem Silo mit 100 m³ Volumen gelagert (siehe Abbildung 3) und nach der Anmischung mit Betriebswasser in die Biologie geleitet. Die PAK wird zusammen mit dem Belebtschlamm in der Nachklärung abgetrennt und gelangt mit dem Überschussschlamm in die Schlammbehandlung. Für eine zusätzliche Feststoffabtrennung wird das Abwasser noch über einen kontinuierlich durchflossenen Filter geleitet.

Kontaktpersonen:

Betreiber:
 Stadtentwässerung
 Wetzikon
 Thomas Bhend
 044'933'65'30

Planung:
 Holinger AG, Liestal
 Tel. 061 926 23 23

Dimensionierung und Technologien

Parameter	Einheit	Wert
max. Zulauf PAK-Anlage	l/s	450 (Bestand, vor Ausbau ARA)
min. Kontaktzeit PAK in der Nachbelüftungszone	min	30
Volumen Belebungsbecken gesamt inkl. NB	m ³	2 x 1'035 + 2 x 2070 (Bestand, vor Ausbau ARA)
min. Aufenthaltszeit Sedimentation	h	2.3
max. Oberflächenbeschickung PAK-Sedimentation	m/h	1.6 (Bestand, vor Ausbau ARA)
Max. Zulauf Filter	l/s	450 (Bestand, vor Ausbau ARA)
Schichtdicke Filter	m	1.5

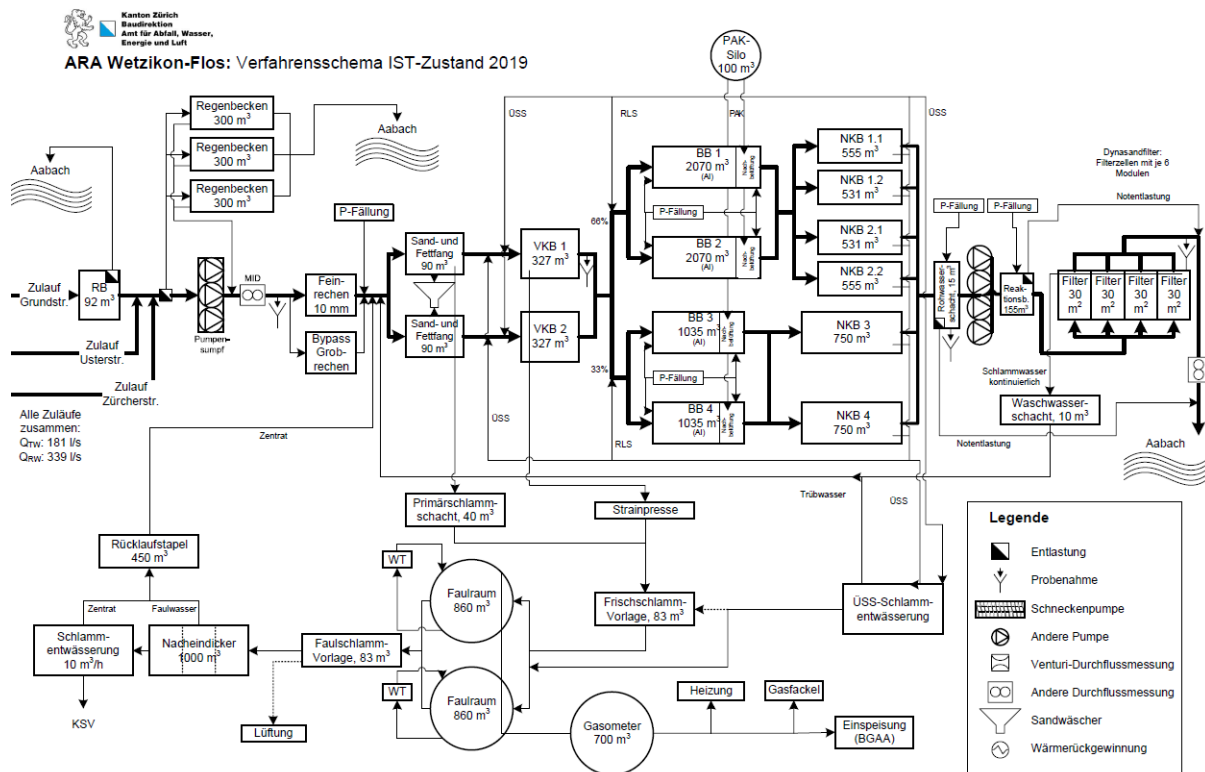


Abbildung 1: Verfahrensschema PAK-Dosierung



Abbildung 2: PAK-Dosierstelle in die Belebtschlamm-Biologie



Abbildung 3: PAK-Silo mit integrierter Dosierstation

Ausgangslage

Die ARA Wetzikon ist aufgrund ihrer Lage im Einzugsgebiet des Greifensee, den rund 32'000 angeschlossenen Einwohnern und dem schlechten Verdünnungsverhältnis im Vorfluter ausbaupflichtig. Zwischen 2012 und 2014 fand auf der ARA Wetzikon ein [Pilotversuch](#) statt, da es sich bei der Dosierung von PAK in die Belebtschlamm-Biologie um eine neue Anwendung von PAK handelt. Basierend auf den positiven Resultaten des Versuchs entschied die Stadtentwässerung Wetzikon, dieses Verfahren zu realisieren.

Realisierung und Kosten

Der Ausbau erfolgte im Jahr 2018. Seit Februar 2019 steht die Anlage in Betrieb (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Die Investitionskosten betrugen 860'000.- Franken (exkl. MwSt.).



Die erste Anlage der Schweiz zur Elimination von Mikroverunreinigungen

ARA**Neugut** – erste grosstechnische Ozonung

Mikroverunreinigungen (Reinigungsmittel- und Medikamentenrückstände, Pestizide u.a.) gelangen kontinuierlich in grossen Mengen via Kanalisationsleitungen in die Abwasserreinigungsanlagen. Die heutigen Reinigungsstufen auf Abwasserreinigungsanlagen halten diese Stoffe nur teilweise oder gar nicht zurück und so gelangen sie in die Oberflächengewässer, wo sie schädlich sind. Eine zusätzliche Reinigungsstufe soll dies in Zukunft verhindern.

Seit dem 24. März 2014 ist die erste volltechnische Anlage der Schweiz zur Elimination dieser Stoffe in Dübendorf in Betrieb. Die neue Gesetzgebung zur Elimination von Mikroverunreinigungen trat am 1. Januar 2016 in Kraft.

Die Abwasserreinigungsanlage Neugut weist folgende Reinigungsstufen auf:

- Mechanische Reinigung (Grob- und Feinrechen, Sand- und Fettfang, Vorklärung)
- Biologie mit biologischer Phosphatelimination, Nitrifikation und Denitrifikation
- Ozonung (Elimination der Mikroverunreinigungen)
- Sandfiltration mit möglicher Nachfällung.

Der anfallende Klärschlamm wird in einer anaerob mesophilen Faulung behandelt, entwässert und der thermischen Verwertung zugeführt.

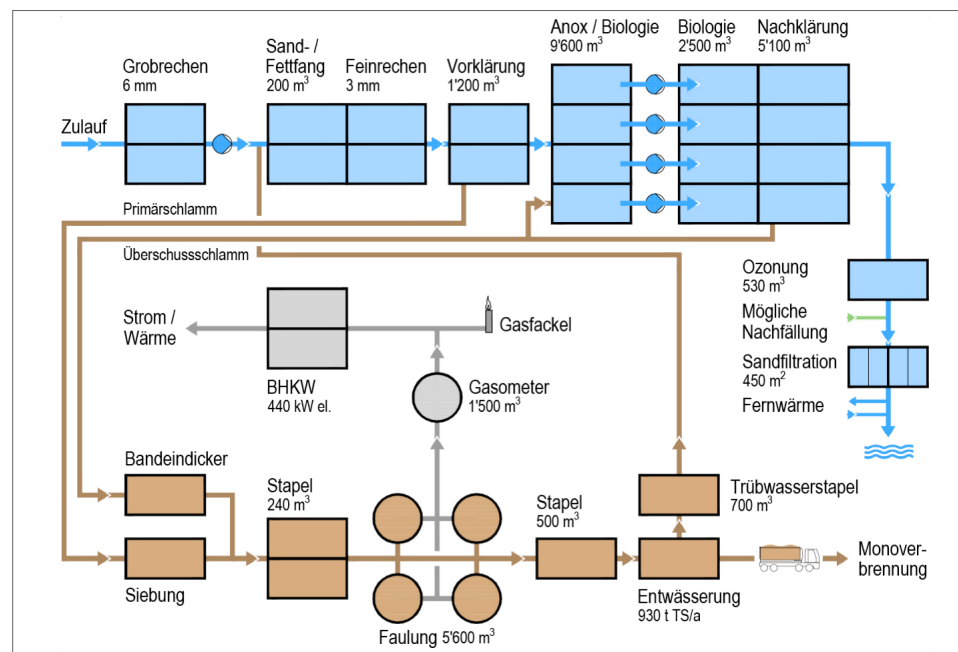


Abbildung 1: Verfahrensschema Abwasserreinigungsanlage Neugut.

Integration der Ozonung in den Reinigungsprozess

Das biologisch gereinigte Wasser gelangt ohne Zusatzpumpwerk, im hydraulisch freien Gefälle, von der Nachklärung zum Ozonreaktor und von dort in die Sandfiltration. Die Ozonanlage ist im bestehenden Gebäude der Filtration installiert.

Die Abwasserreinigungsanlage Neugut reinigt die Abwässer von Dübendorf, Dietlikon, Wangen-Brüttellen sowie Teile von Wallisellen.



ARA**Neugut**, Dübendorf



Reinsauerstofftank mit Verdampfer

Kennzahlen Einzugsgebiet (EZG)

Kanalnetz	177 km
Anzahl Regenbecken (RB)	19
Fläche red. EZG	161 ha
RB-Rückhaltevolumenproha _{red}	53 m³
Fremdwasseranteil	20–25 %

Kapazität der Abwasserreinigungsanlage

Einwohnerwerte (CSB, N, P)	150'000 EW
Q _{max}	660 l/s

Belastung

Belastung Total	105'000 EW
davon Einwohner	50'000 EW
davon Industrie	55'000 EW

Q Tageszufluss 13'000 – 57'000 m³/d

Q _{min}	70 l/s
Q _{mittel} Trockenwetter	200 l/s
Q _{max} behandelt	660 l/s

Bei der Elimination von Mikroverunreinigungen entstehen biologisch abbaubare Transformationsprodukte (TP). Gemäss Empfehlung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) sollen diese TP vor der Einleitung in ein Gewässer in einer Nachbehandlungstufe biologisch eliminiert werden. In der ARANEugut erfüllt dies die biologisch aktive Sandfiltration.

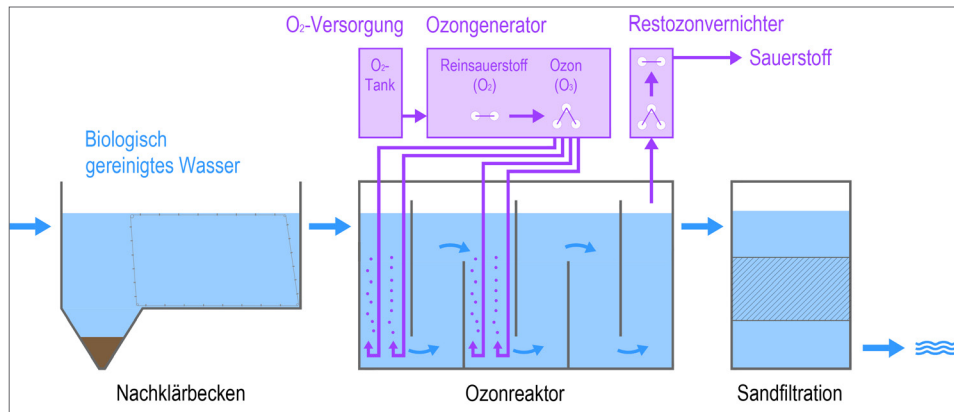


Abbildung 2: Schema der Ozonung.

Betriebserfahrungen und Innovationen

Die Ozonung ist im Betrieb stabil, zuverlässig in der Eliminationsleistung und hat Dank geringem Bedienungsaufwand auch niedrige Betriebskosten. Durchgeführte in vitro und in vivo Biotests weisen die positive Wirkung der Ozonung und der Nachbehandlung (Sandfiltration) nach (Eawag, Juni 2015).

Die Abbildung 3 weist die Eliminationsleistung von Leitsubstanzen über die gesamte Abwasserreinigungsanlage nach, im Mittel 84%. Gesetzlich gefordert ist eine mittlere Eliminationsleistung von 80%. Die konstante Eliminationsleistung wird durch die von Max Schachtler (ARANEugut) entwickelte, wegweisende BEAR-Regelstrategie (Best Elimination, Analysis and MonitoRing) erreicht.

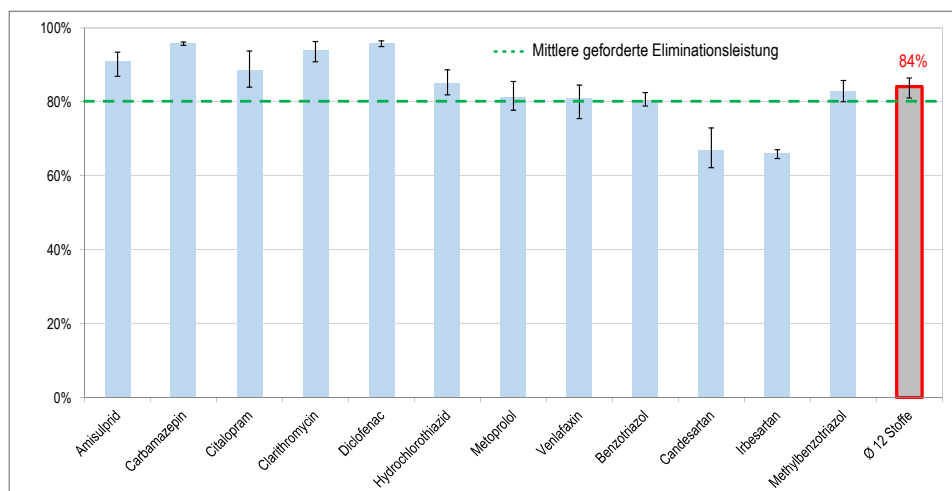
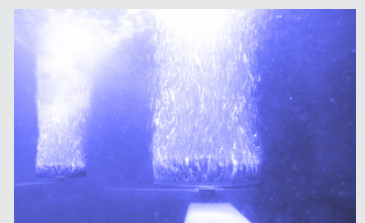


Abbildung 3: Eliminationsleistung mit 2.2 gO₃/m³ oder 0.42 gO₃/g DOC über die Gesamtanlage mit der BEAR-Regelstrategie und dem LOD-Betriebskonzept; 5 Messtage, 24 Std.-Sammelproben.

Erstmals überwacht und regelt eine Strategie die Elimination der Leitsubstanzen stabil auf einen vorgegebenen Wert; im volltechnischen, kontinuierlichen und automatisierten Prozess. Die Zuverlässigkeit der BEAR-Regelstrategie ist durch die umfangreiche Messanalytik der Leitsubstanzen nachgewiesen.

Die Anwendung des neu eingeführten LOD-Betriebskonzeptes (Low-Ozon-Dosage) verringert die notwendige Ozonkonzentration um 15-20%, bei gleicher Eliminationsleistung. Zudem ermöglicht das LOD-Betriebskonzept weitere Entwicklungsschritte. (BEAR-Regelstrategie/LOD-Betriebskonzept: siehe Artikel Aqua & Gas Mai 2016 und Herbst 2016)

Zufluss Ozonung Mittelwerte	
CSB	16.0 mg/l
DOC	5.3 mg/l
NH ₄ -N	0.08 mg/l
NO ₂ -N	0.03 mg/l
pH	7.4
Q-Vollstrom	70–660 l/s
Dimensionierung Ozonung	
Reinsauerstofftank	30 m ³
Generatoren	2 x 5.5 kgO ₃ /h
Ozonreaktor	
Inhalt	530 m ³
Wassertiefe	6.0 m
Begasungskammern	2 Stück
Keramikk diffusoren	je 20 + 33 Stück
Aufenthaltszeitmin	13 Min.
Aufenthaltszeit mittel	37 Min.



Ozoneintrag in Reaktor mit Keramikdiffusoren

Kosten der Ozonung	
Brutto-Investition CHF	3.27 Mio.
Amortisation, Unterhalt	
60a Bau, 15a Ausrüstung, 10a EMSR; 2% Zins; 3% Unterhalt	0.025 CHF/m ³
Betriebskosten	0.014 CHF/m ³
Kosten EinwohnerInnen total	6 CHF/a

Betriebskosten Ozonung 110'000 CHF/a	
Reinsauerstoff	40 %
Strom	20 %
Analytik Leitsubstanzen	20 %
Personal und Overhead	20 %

Energiebedarf	
Reinsauerstoff	28 g/m ³
Strom Ozonung	0.024 kWh/m ³
Gesamte Kläranlage Wassermenge 8 Mio. m ³ /a	0.42 kWh/m ³

Eliminationsleistung	
Leitsubstanzen über gesamte ARA	80–86 %
DOC-Reduktion Ozonung bis Sandfiltration	18–24 %
Ozondosierung pro g DOC	0.33–0.5 gO ₃
Ozondosierung pro m ³	1.6–2.7 gO ₃

Ozonung Planung / Realisierung	
HOLINGER AG, Liestal	
Ingenieurbüro Gujer AG, Rümlang	

Impressum	
Max Schachtler	
Nathalie Hubaux	

ARANEugut, Otto-Jaag-Strasse 15	
CH - 8600 Dübendorf	
+41 (0) 44 818 80 20, www.neugut.ch	

Mai 2016

Ozonung Kläranlage Morgental und Hofen

grosstechnische Umsetzung, in Betrieb seit August 2021

Anlagenbeschrieb

Die Kläranlagen Morgental und Hofen haben zusammen auf dem Areal der Kläranlage Morgental eine gemeinsame Reinigungsstufe zur Elimination von Spurenstoffen erstellt. Das gereinigte Abwasser der Kläranlage Hofen wird vor die neue Reinigungsstufe geleitet. Nach der Nachklärung der ARA Morgental wurde eine 2-strassige Ozonungsanlage und eine Sandfiltration erstellt. Das Ozon wird in 2 Ozongeneratoren (1 pro Strasse, mit einer max. Kapazität von 30.3 kgO₃/h) hergestellt, über eine Kollektorleitung zu den zwei Ozonreaktoren geleitet und über Keramikbelüfter in zwei Kammern der Reaktoren (total 907 m³) eingeblasen. Der Sauerstoff wird flüssig angeliefert und im Tank gelagert. Nach der Ozonung durchfliesst das behandelte Abwasser die Filtrationsstufe.

Situation Kläranlage Morgental+Hofen:

Belastung	Einwohnerwerte (EW)
Einwohner	88'000 EW
Industrie/Gewerbe	72'000
Total	160'000
Zulauf	
Trockenwetter (Spitze)	460 l/s
Max. Zulauf bei Regenwetter	3'960 l/s
Verfahrenstechnik	
Mechanische Stufe	Umlaufrechen, Belüfteter Fett- und Sandfang, Vorklärbecken
Biologische Stufe	6 à 2 Halbstrassen (Belebtschlamm)
Chemische Stufe	Vor- (Sandfang), Simultanfällung (Biologie) mit Eisensalzen
Elimination von Mikroverunreinigungen	Ozonierung und 1-Schicht-Sandfilter als biologische Nachbehandlung
Filter	1-Schicht-Sandfilter (1.2 m Blähschiefer)



Ausgangslage

Das Klärwerk Morgental reinigt das Abwasser von acht Gemeinden der Kantone Thurgau und St. Gallen: Arbon, Teile von Egnach, Horn, Roggwil, Berg, Mörschwil, Steinach und Tübach. Zusätzlich kommt zur Elimination der Mikroverunreinigungen das in der ARA Hofen biologisch gereinigte Abwasser von den Gemeinden St. Gallen Ost (SG), Wittenbach (SG) und Teile von Speicher (AG).

Kontakt:

Betreiber:

Entsorgung St. Gallen (ESG)
 Marco Sonderegger
 +41 71 224 55 96
 Abwasserverband Morgental (AVM)
 Roland Boller
 +41 71 447 12 80
 Bleichestrasse 45
 CH-9323 Steinach

Projektingenieur:

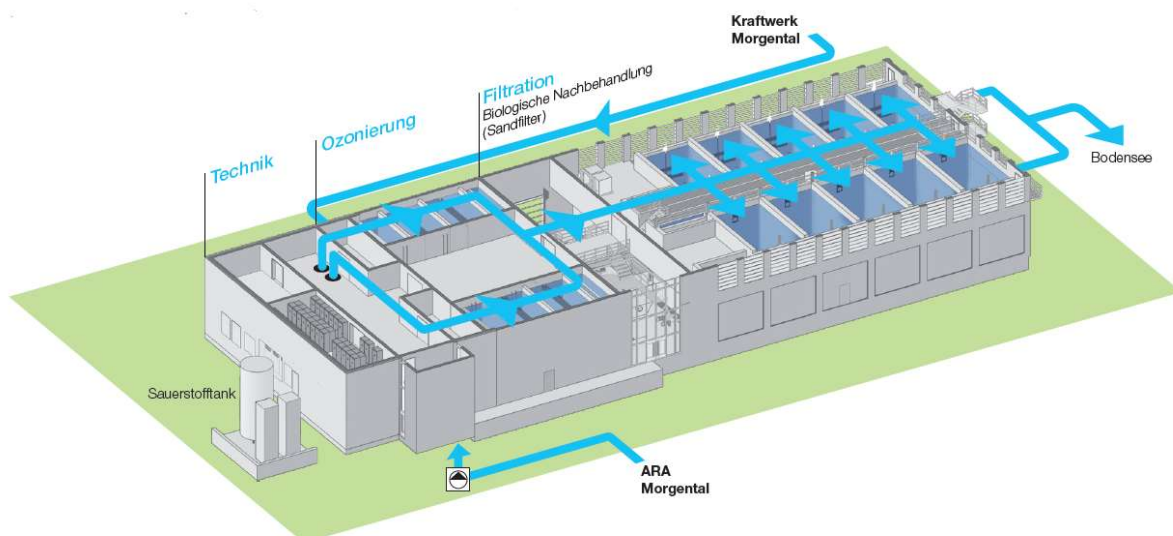
Hunziker Betatech AG

Mit der Projektierung wurde 2015 begonnen. Schon seit 2014 fliesst das gereinigte Abwasser von der ARA Hofen durch eine Druckleitung zum Kleinwasserkraftwerk Morgental in Steinach und von dort zusammen mit dem gereinigten Abwasser der ARA Morgental über eine Tiefeneinleitung in den Bodensee. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, die Abwässer der ARA Hofen und der ARA Morgental in der gleichen Anlage von Mikroverunreinigungen zu befreien. Das Prinzip der kombinierten Elimination der Mikroverunreinigungen ist bisher schweizweit einzigartig und bietet eine kostengünstige und betrieblich effizientere Lösung. Die Bauarbeiten konnten im November 2018 planmässig beginnen und im August 2021 abgeschlossen werden. Bis Ende 2021 erfolgen Inbetriebnahme und Optimierungen. Dank dem Einsatz aller Akteure ist ab dem 1. Januar 2022 der Regelbetrieb der EMV möglich.

Dimensionierungsgrundlagen und Technologien

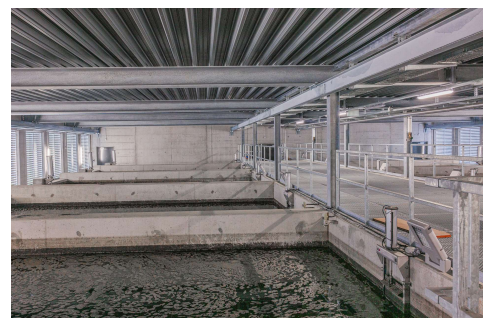
	Einheit	Wert
Max. Abwassermenge durch MV-Stufe (inkl. Rückläufe)	l/s	900
Max. Ozondosierung bei $Q_{TW,max}$ (533 l/s)	mgO ₃ /l	15.9
Max. Ozonproduktion	kgO ₃ /h	30.3
Volumen Kontaktreaktor	m ³	907
Wassertiefe	m	7
Anzahl Begasungskammer	-	2 x 2
Aufenthaltszeit im Reaktor bei Q_{max} (2 Reaktoren)	min	28.5
Aufenthaltszeit im Reaktor bei $Q_{TW,max}$	min	16.8
Anzahl Filterzellen	-	10
Fläche pro Filterzelle	m ²	43.5

Kurzbeschreibung / 3D-Darstellung der MV Stufe



Realisierung und Kosten

Der Spatenstich war im November 2019, im Januar 2022 wird die Anlage in den Regelbetrieb gehen. Die Gesamtkosten liegen bei rund 23.2 Mio. Fr. und wurden im Anteil von 75% vom Bund übernommen.



Pulveraktivkohledosierung (PAK) ARA Thunersee

grosstechnische Umsetzung, in Betrieb seit Juni 2018

Situation ARA Thunersee:

Belastung	Einwohnerwerte (EW)
Einwohner	124'000
Industrie	26'000
Total	150'000

Zulauf

Trockenwetter	500 l/s
Max. Zulauf bei Regenwetter	1'350 l/s



Verfahrenstechnik

Mechanische Stufe	Grob- und Feinrechen, Sandfang, Vorklärung
Biologische Stufe	Biologie (Nitrifikation, Denitrifikation, Bio-P), Nachklärbecken
Chemische Stufe	Phosphatfällung (Zugabe Eisenchlorid in Rücklaufschlamm)
Elimination von Mikroverunreinigungen	PAK-Kontaktbecken, Sedimentation (mit Kettenräumer) (zusätzliche Installationen: 2 PAK-Silos, 2 PAK-Dosierstationen)
Filter	Nachgeschaltete 2-Schicht-Filtration Sand, Anthrazit

Anlagenbeschrieb

Auf der ARA Thunersee wurde der Biologie eine Pulveraktivkohledosierung mit 2 Kontaktbecken (je 1'100 m³), 4 Sedimentationsbecken (je 1'944 m³) und 8 Filterzellen (je 42.2 m²) nachgeschaltet (Schema siehe Abbildung 1). Der PAK-Überschussschlamm wird in den Rücklaufschlamm der Biologie geleitet. Die PAK wird in 2 Silos (80 m³) gelagert und nach der Anmischung mit Betriebswasser in die Kontaktbecken geleitet. Es handelt sich um eine Teilstromanlage, welche 800 l/s (= 1.5 Q_{TW,max}) der gesamthaft 1'350 l/s behandelt.

Dimensionierungsgrundlagen und Technologien

Parameter	Einheit	Wert
max. Zulauf PAK-Anlage	l/s	800
min. Kontaktzeit PAK-Reaktor	min	46
min. Aufenthaltszeit PAK-Sedimentation	h	2.7
max. Oberflächenbeschickung PAK-Sedimentation	m/h	1.8
Max. Filtergeschwindigkeit	m/h	9.8
Rückführung PAK-Überschussschlamm		in die Biologie
Max. Zulauf Filter	l/s	800

Kontakt:

Betreiber:

Gemeindeverband
www.arathunersee.ch
 Hanspeter Reist,
 Projektleiter
 033 346 03 83

Bruno Bangerter
 Geschäftsführer
 033 346 03 81

Projektingenieur:

Beat Bühlmann, Ryser
 Ingenieure AG, Bern
 031 560 03 03

Bauherrenberatung:

David Salzgeber,
 Holinger AG Bern
 031 370 30 11

Schema

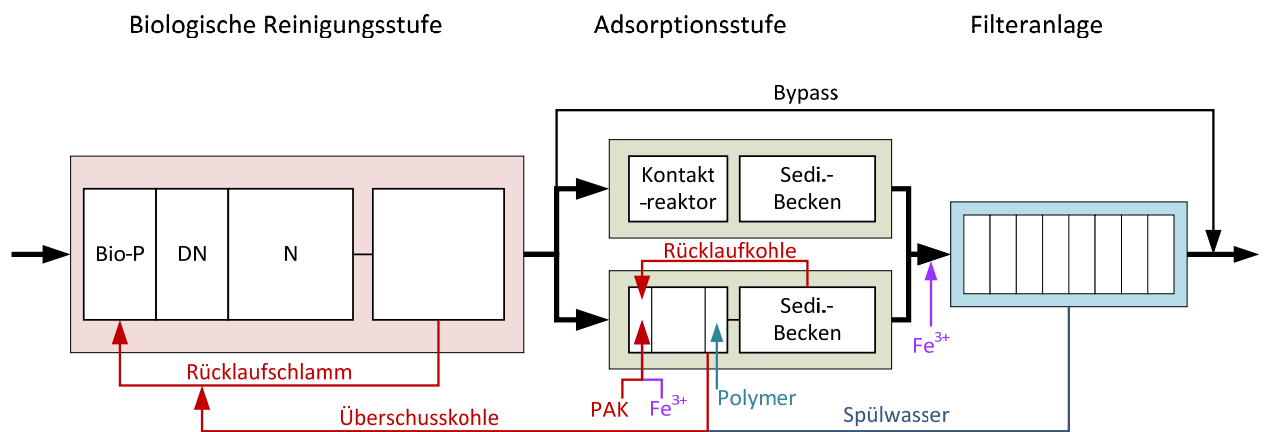


Abbildung 1: Fließschema PAK-Dosierung mit PAK-Rezirkulation und Rückführung PAK-Überschusschlamm in den Rücklaufschlamm der Biologie.

Ausgangslage

Die ARA Thunersee verfügte über ausreichend Baulandreserve und ist mit über 120'000 Einwohnern ausbaupflichtig. Die Aare als Vorfluter infiltriert in zahlreiche Grundwasserfassungen. In der kantonalen Planung zur Realisierung der erforderlichen Anlagen zur Elimination von Spurenstoffen steht die ARA Thunersee deshalb in erster Priorität mit einer Realisierungsfrist bis 2025. Da ab 2022 grössere Sanierungsvorhaben auf dem Programm standen, war ein rascher Ausbau angezeigt.

Realisierung und Kosten

Der Ausbau nach dem Ulmer Verfahren erfolgte 2016 bis 2018. Seit Juni 2018 steht die Anlage in Betrieb (siehe Abbildung 2). Die Investitionskosten betrugen 18.9 Mio. Franken und die geschätzten Betriebskosten liegen bei 700'000 Franken.



Abbildung 2: Luftansicht des neuen Anlageteils

PAK-Behandlung auf der ARA Schöna, Cham

Situation ARA Schöna:

Ausbaugrösse

Einwohner (2017)	150'000
EW _{CSB}	245'000

Zulauf

TW (Mittel)	500 l/s
Max. bei RW	1'600 l/s



Verfahrenstechnik

Mechanische Stufe	Rechen, Sandfang, Vorklärbecken
Biologische Stufe	Anaerob-, Denitrifikations- und Belebungsbecken (biol. Phosphor- und Stickstoffelimination), Nachklärung, Flockungsfiltration
Chemische Stufe	Phosphatfällung (Biologie / vor Filter)
Filtration	Sandfilter (2-Schicht, Sand / Anthrazit)

Ziel und Hintergrund

Mit dem seit Anfang 2016 in Kraft getretenen neuen Gewässerschutzgesetzes (GSchG) und der neuen Gewässerschutzverordnung (GSchV) muss die ARA Schöna gemäss folgender Kriterien Massnahmen zur Elimination von organischen Spurenstoffen treffen:

1. Aufgrund der Anzahl angeschlossener Einwohner (> 80'000) muss ein Ausbau erfolgen.
2. Die ARA Schöna besitzt einen Vorfluter, dessen Abwasseranteil bei Tiefstand ($Q_{347, \text{Lorze}}$) bei 15% liegt. Das Kriterium zum maximalen Abwasseranteil im Vorfluter von 10% wird überschritten.

Die ARA Schöna ist für Mikroverunreinigungen in der Region Zug ein Haupteintragsweg und hat dadurch einen wesentlichen Einfluss auf die chemischen Qualitätskriterien und den Zustand der Lorze. Flussabwärts der Einleitstelle werden zudem zwei Trinkwasserpumpwerke genutzt, dessen Wasser sich zum Teil aus Uferfiltrat der Lorze speist. In den Fassungen dieser Pumpwerke lässt sich der Abwassereinfluss aus der ARA Schöna nachweisen.

Projektbeteiligte:

Betreiber

Gewässerschutzverband der
Region Zugersee-
Küssnachersee-Ägerisee
(GVRZ) www.gvrz.ch
Dr. Bernd Kobler
Geschäftsführer

Projektingenieur:

Pöyry Schweiz AG
www.poyry.ch
Dr. Knut Leikam
Tel. 044 355 55 55

Verfahren und Technologien

In einer ergebnisoffenen Variantenstudie unter Berücksichtigung von vorgängigen Versuchen hat sich das Verfahren mit der Dosierung vor den Filter und der zusätzlichen Möglichkeit der Direkt dosierung als das wirtschaftlichste, effektivste und flexibelste Verfahren erwiesen.

Die Pulveraktivkohle (PAK) wird nach der Nachklärung über 2-strassig ausgeführte Misch- und Kontaktbecken (je Strasse ca. 700 m³) direkt vor die bestehende Raumfiltration gegeben. In der ersten Zone der Becken wird dem Abwasser PAK und im folgenden Kompartiment Fällmittel zugemischt. Die nachfolgenden Kompartimente dienen als Kontakt- und Reifezone. Zum einen erfolgt eine erste Adsorption von organischen Spurenstoffen an die Aktivkohle, zum anderen sollen unter schonender Durchmischung geeignete Flockenkonglomerate für die nachfolgende Einlagerung im Zweischichtfilter gebildet werden. Das PAK-Abwassergemisch lagert sich

dort zur Abtrennung im Filterbett ein. Für den Ausbau der ARA Schönau mit dem gewählten Verfahren stellt die bestehende Raumfiltration eine zentrale Anlagenstufe für das Erreichen der angestrebten Reinigungsleistung dar. Die Filtration gewährleistet zum einen den Rückhalt der PAK und zum anderen ermöglicht sie dessen Einlagerung, um deren Adsorptionsleistung auszuschöpfen. In vorgängigen Pilot-Versuchen wurde die Eignung sowie das Verhalten des Filtermaterials (Sand / Anthrazit) ausgiebig getestet. Für den Betrieb mit PAK wurde die Filtration steuerungstechnisch auf den neuesten Stand gebracht, sowie Trübungsmessungen in den Abläufen der Filterzellen installiert.

Die verbrauchte PAK gelangt über das Filtrerrückspülwasser in die Belebungsbecken und wird dort über den Überschussschlamm und letztlich im Klärschlamm ausgetragen. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit PAK direkt in die Belebungsbecken zu dosieren (Direktdosierung). Die Lagerung erfolgt in zwei Silos (je 120 m³), welche vier unabhängige Wäge- und Dosiereinheiten speisen.

Das Verfahren weist in diesem Fall gegenüber anderen Behandlungsmethoden folgende Vorteile auf:

- Keine gefährliche bzw. schädlichen Nebenprodukte durch Reaktion mit anderen Wasserinhaltsstoffen
- Verfahrenstechnische Redundanz durch Möglichkeit der Direktdosierung
- Pufferwirkung gegen Belastungsschüsse durch die Einlagerung der PAK im Filter
- Flexibilität bei der Dosiermenge und der Wahl der PAK
- Hohe Effizienz durch doppelte Nutzung der PAK im Filter und in der Biologie (Gegenstrom)

Dimensionierungsgrundlagen

Parameter	Einheit	Wert
max. Zulauf PAK-Anlage	l/s	1600
min. Kontaktzeit in Misch- / Kontaktbecken	min	15
Max. Filtergeschwindigkeit	m/h	16
min. Verweilzeit Abwasser in Filter (mit mittlerem Überstau)	min	10
Rückführung PAK-Überschussschlamm	Belebungsbecken mit Filterschlammwasser	
max. Zulauf Filter	l/s	1600

Verfahrensschema

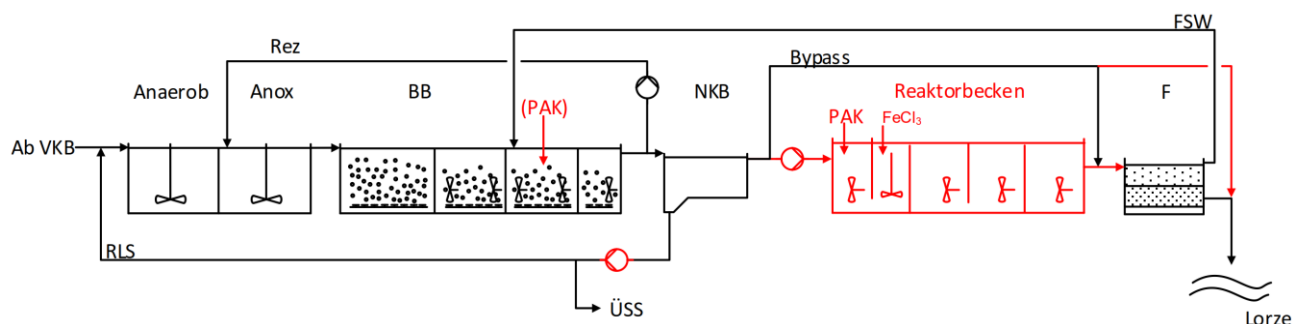


Abbildung 1: Verfahrensschema ab VKB mit Erweiterung der ARA Schönau um EMV-Stufe

Durch das eingeschränkte Platzangebot wird die bestehende Infrastruktur ideal weitergenutzt und der Bestand sinnvoll erweitert. So konnten die Misch- und Kontaktbecken in ein bestehendes Anaerobbecken integriert werden. Auch das Zwischenpumpwerk wird in ein schon bestehendes Pumpwerk eingebracht. Zusätzlich wurde Platz für eine neues, verbessertes Rücklaufschlamm-Pumpwerk geschaffen. Insgesamt wird dadurch eine sehr effiziente Platzausnutzung und eine Verbesserung der Betriebsabläufe erreicht, ohne das ARA Areal zu erweitern. Die Bauausführung verlief planmässig und gemäss Budget (15.5 Mio. CHF). Die Inbetriebsetzung der EMV Stufe wurde im Dez. 2018/ Jan. 2019 erfolgreich durchgeführt. Im Verlauf von 2019 werden unterschiedliche Betriebsprogramme getestet und die Anlage im Betrieb optimiert.

Ozonung Klärwerk Werdhölzli, Zürich

grosstechnische Umsetzung, in Betrieb seit August 2018

Situation Klärwerk Werdhölzli:

Belastung	Einwohnerwerte (EW)
Einwohner	450'000
Industrie/Ge- werbe	ca. 200'000
Total	650'000

Zulauf	
Trockenwetter (Spitze)	2'500 l/s
Max. Zulauf bei Regen- wetter	6'000 l/s

Verfahrenstechnik	
Mechanische Stufe	Grobrechen, Belüfteter Öl- und Sandfang, Vorklärbecken
Biologische Stufe	6 A/I-Strassen (Belebtschlamm)
Chemische Stufe	Simultanfällung in Biologie mit Eisensalzen
Elimination von Mikroverunreini- gungen	Ozon, mit eigener Reinsauerstoffproduktion
Filter	1-Schicht-Sandfilter (1.2 m Blähschiefer)



Anlagenbeschreibung

Zwischen den bestehenden Biologiebecken und der Sandfiltration wurde eine 4-strassige Ozonungsanlage erstellt. Aufgrund der hydraulischen Verhältnisse war ein neues Hebewerk nötig. Das Ozon wird in 8 Ozongeneratoren (2 pro Strasse, mit einer max. Kapazität von je 19 kgO₃/h) hergestellt und mit Röhrendiffusoren in zwei Kammern der Reaktoren (4 x 1535 m³) eingetragen. Der Sauerstoff wird in einer VPSA-Anlage aus der Umgebungsluft erzeugt (180–540 kgO₂/h). Die Reinheit des erzeugten Sauerstoffs beträgt rund 93%. Zusätzlich wurde ein Reinsauerstofftank (60 m³) erstellt, um Belastungsspitzen sowie Revisionen der VPSA-Anlage abzufangen. Nach der Ozonung gelangt das Abwasser über eine Dükerleitung in die Filtration.

Kontakt:

Betreiber:

ERZ Entsorgung und
Recycling Zürich
Klärwerk Werdhölzli
Bändlistrasse 108
8064 Zürich
044 645 55 55

Projektingenieur:

INGE Holinger AG /
Hunziker-Betatech

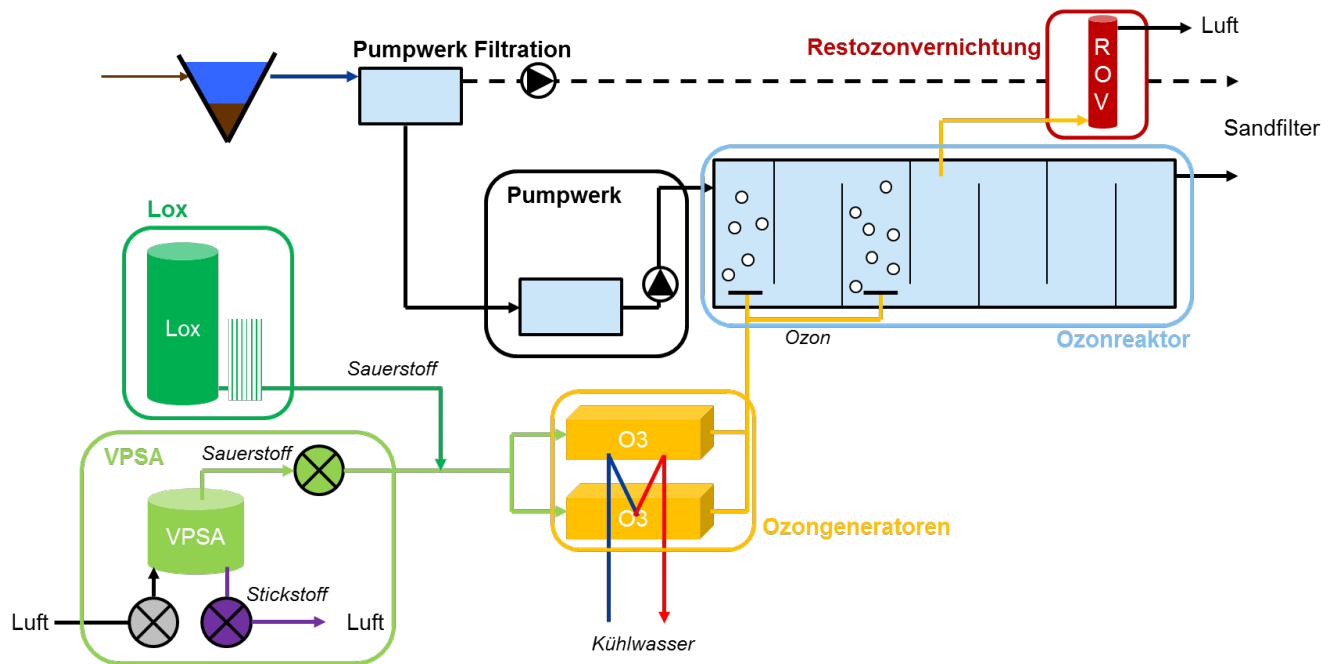
Projektbegleitung:

Gujer AG

Dimensionierungsgrundlagen und Technologien

	Einheit	Wert
Max. Abwassermenge durch MV-Stufe (inkl. Rückläufe)	l/s	8'600
Max. Ozondosierung bei Q _{TW,max} (2'500 l/s)	mgO ₃ /l	6
Max. Ozonproduktion	kgO ₃ /h	8 x 19
Volumen Kontaktreaktor	m ³	4 x 1'535
Wassertiefe	m	7.8
Anzahl Begasungskammer	-	2
Aufenthaltszeit im Reaktor bei Q _{max} (4 Reaktoren)	min	16.7
Aufenthaltszeit im Reaktor bei Q _{TW,max}	min	40
Anzahl Filterzellen	-	18
Fläche pro Filterzelle	m ²	85

Kurzbeschreibung / Fließschema



Ausgangslage

Das Klärwerk Werdhölzli reinigt das Abwasser der Stadt Zürich sowie der Gemeinden Kilchberg, Zollikon, Zumikon sowie von Teilen von Opfikon, Rümlang und Wallisellen. Mit einer Ausbaugröße von 670'000 EW und rund 450'000 angeschlossenen Einwohnern ist es zurzeit die grösste Kläranlage der Schweiz. Die biologische Stufe wurde von 2010 bis 2013 erneuert.

Die Projektierung wurde 2014 in Angriff genommen. Unter anderem aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse und dem bereits vorhandenen Sandfilter fiel die Wahl auf eine Ozonung. Dies bedingt, dass das bromidhaltige Abwasser der Kehrichtverbrennungsanlage nun separat abgeleitet und nach der Ozonung zugegeben wird. Dadurch wird eine übermäßige Bromatbildung verhindert. Im Dezember 2015 war der Spatenstich, im Sommer 2018 wurde die Anlage dem Betrieb übergeben.

Realisierung und Kosten

Um die Anlage überhaupt bauen zu können, musste das Areal erweitert und ein Fussweg sowie eine Hochdruck-Erdgasleitung verlegt werden. Da der bestehende und sanierungsbedürftige Ablaufkanal im Baufeld lag, wurde gleichzeitig ein neuer Ablaufkanal errichtet. Der Spatenstich war im Dezember 2015, im Frühling/Sommer 2018 wurde die Anlage in Betrieb genommen. Die Gesamtkosten lagen bei rund 38.6 Mio. Fr.

Betriebserfahrungen und Erkenntnisse

- Nach anfänglichen Kinderkrankheiten (Zusammenspiel der O₂-Quellen, Druckverhältnisse in den Reaktoren, Kühlung) läuft die Anlage einwandfrei. Die Sauerstoffproduktion und das Zusammenspiel mit dem Flüssigsauerstoff funktionieren zuverlässig.
- Die Ozondosierung wird mit UV-Sonden geregelt, die gleichzeitig zur Überwachung der Reinigungsleistung genutzt werden.
- Bei längeren Regenereignissen ist die korrekte Ozondosierung anspruchsvoll.
- Die geforderte Spurenstoffelimination wird bei einer Dosierung von ca. 0.5 mgO₃/mgDOC erreicht. Die Optimierungen sind noch nicht abgeschlossen.
- Instabilitäten im Stromnetz führen zu kurzen Ausfällen der Ozongeneratoren
- Der Stromverbrauch verteilt sich zu je etwa einem Drittel auf Sauerstofferzeugung, Ozonproduktion und weitere Aggregate (Pumpwerk, HLK, Restozonvernichtung etc.)

CAG en lit fluidisé à la STEP de Penthaz

Réalisation à l'échelle industrielle, en service depuis octobre 2018

Situation STEP de Penthaz

Charge	Equivalent Habitant (EH)
Habitants	12'000
Industrie	2'000
Total	14'000
Entrée	
Temps sec	30 l/s
Débit max en temps de pluie	150 l/s

Procédés de traitement

Traitement primaire	Dégrillage grossier et fin, dessablage/déshuilage, décantation primaire
Traitement biologique	Boues activées (Anoxie, Anaérobie, Aérobie)
Traitement chimique	Déphosphatation chimique et biologique
Filtration	Filtres à disques 10µm



Situation initiale

La STEP de Penthaz, avec ses 12'000 habitants raccordés et son rejet d'eau épurée représentant plus de 10% du débit de la Venoge, a été la première STEP du canton de Vaud à s'équiper d'un traitement des micropolluants. Après une rénovation et extension de la STEP en 2015, une étape de traitement des micropolluants par CAG en lit fluidisé est donc venue compléter l'installation en 2018.

Ce procédé de traitement a d'abord été testé lors d'un essai pilote entre février 2016 et août 2017 qui a permis de montrer que le procédé permet d'éliminer les micropolluants des eaux usées selon les bases légales suisses et se révèle pertinent pour une STEP comme celle de Penthaz.

Technologie et bases pour le dimensionnement

Paramètre	Unité	Valeur
Débit max. traitement des MP	l/s	90
Vitesse ascensionnelle	m/h	7 à 15 (max. 20)
Volume du silo	m³	25
Hauteur du lit au repos	m	1.5
Hauteur du lit en expansion (15 m/h)	m	2.2
Granulométrie du CAG	mm	0.2 à 0.9 (moyenne 0.5)
Charbon actif dosé (moyenne)	kg/j	45
Age moyen du CAG	j	env. 350

Description de l'installation

L'étape de traitement des micropolluants a été réalisée en deux lignes de traitement. Elle est alimentée en débit partiel (max. 90 l/s) avec les eaux usées provenant de la filtration sur disques (complément à la décantation secondaire). Les eaux sont pompées depuis une fosse puis alimentent les deux réacteurs en flux ascendant.

Contact

Exploitant :

Association intercommunale pour l'épuration des eaux usées (AIEE)

Jean-Pascal Golay

021 862 72 77

www.stepdepenthaz.ch

Planificateur général

Raphaël Casazza

Triform SA, Fribourg

026 347 22 85

www.triform.ch

Fournisseur

Saur/Stereau, Yverdon

Le charbon est retenu par gravité dans l'ouvrage et l'eau épurée est collectée par surverse et rejetée dans la Venoge. Le charbon actif en grain est stocké dans un silo (en zone EX), depuis lequel il est transporté par une vis jusqu'à l'installation de préparation et de dosage. Cette installation permet de mouiller et définir le CAG afin d'éviter que des particules fines ou des flottants (<1% du charbon dosé) ne se retrouvent dans l'effluent. Afin de permettre la fluidisation du lit à des vitesses comprises entre 7 et 20 m/h, la granulométrie du charbon doit se situer entre 0.2 et 0.9 mm (moyenne 0.5 mm). Le charbon actif frais est injecté quotidiennement à un dosage et un intervalle définis en supervision. Le charbon actif usagé est extrait environ une fois par semaine du réacteur. Le mélange eau-charbon est acheminé jusqu'à une benne drainante, où il est stocké avant d'être régénéré en usine.

Schéma

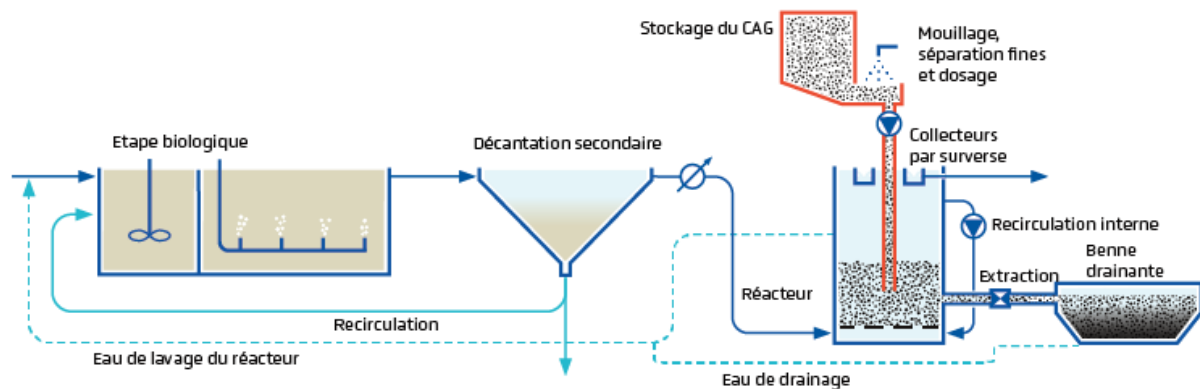


Fig. 1. Schéma de principe des différents éléments du traitement des micropolluants par CAG en lit fluidisé. Dans le cas de la STEP de Penthaz, une filtration sur disques suit la décantation secondaire.

Réalisation et coûts

Les travaux de construction ont duré environ une année et la mise en service a eu lieu en automne 2018 avec une montée en charge progressive jusqu'à la stabilisation de la hauteur du lit de charbon au printemps 2019. Le coût global des travaux s'est élevé à environ 4 millions de CHF TTC.

Expériences d'exploitation

- Le taux d'épuration moyen sur l'ensemble de la STEP est de plus de 80% pour des dosages entre 13 et 15 g/m³.
- Depuis la mise en service, des optimisations ont été effectuées notamment l'ajustement des temps de préparation du charbon afin de pouvoir augmenter la cadence des injections lors des périodes à fort débit.
- Lors de la planification, il avait été prévu que la livraison de CAG frais et la reprise de CAG usagé soient effectuées par un seul camion afin de limiter les transports depuis et vers la Belgique où se trouve l'usine du fournisseur. Ces transferts ont effectivement pu se dérouler de la sorte et ont donné entière satisfaction.
- Un contrôle hebdomadaire de la hauteur du lit de CAG au repos et un contrôle de la hauteur d'expansion à différentes vitesses ascensionnelles est nécessaire. Le calcul du rapport entre les deux hauteurs de lit (ratio d'expansion) permet de suivre la stabilité du lit et l'évolution de la concentration en MES dans le lit de CAG.
- Un lavage à l'eau systématique est déclenché une fois par mois, afin d'éliminer régulièrement les MES du lit de charbon actif. Un lavage à l'air systématique quatre fois par année a été mis en place à titre préventif.
- Les pertes en charbon se situent entre 0 et 3% (en moyenne < 0.5%), ce qui est acceptable selon l'état de la technique actuelle.
- Aucun colmatage des conduites, aucune usure ou abrasion des conduites ou réacteurs n'a été constatée jusque-là.