Pilotanlage zur PFAS/PFC-Reinigung von Bewässerungswasser 2019 bis 2020

Abschlussbericht

Landratsamt Rastatt/ Landwirtschaftsamt
Dr. sc. agr. Ernst E. Walter

Februar 2022

Pilotanlage zur PFAS/PFC-Reinigung von Bewässerungswasser 2019 bis 2020

TABELLENVERZEICHNIS III

ABBILDUNGSVERZEICHNIS III

ABKÜRZUNGEN V

1 EINLEITUNG 1

1.1 Problemstellung 2

1.2 Projektziele 3

2 MATERIAL UND METHODEN 4

2.1 Die Witterung 2019 und 2020 4

2.2 Der Brunnenstandort 4

2.3 Die Komponenten der Pilotanlage 5

2.4 Die Aktivkohle 7

2.5 Kenndaten der Anlage und ihres Einsatzes 2019 und 2020 8

2.6 Kontrolle der Filterleistung und Berechnung der PFBA-Bindung 9

2.7 Filterbefüllung und Wechsel der Filterreihenfolge 10

2.8 Kontrolle der Verkeimung – Mikrobiologische Untersuchungen 10

3 ERGEBNISSE 12

3.1 Die PFC-Konzentrationen im Rohwasser in den Jahren 2019 und 2020 12

3.2 Die Filterwirkung im Verlauf der Jahre 2019 und 2020 13

3.3 PFBA-Bindung der Aktivkohlefüllungen A, B, C, D als 1. und 2. Filter 14

3.4 PFBA-Bindung der Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter 18

3.5 Kontrolle der Verkeimung – Mikrobiologische Untersuchungen 23

3.6 Kostenkalkulation 24

3.7 Erfahrungen des Betriebsleiters 25

4 DISKUSSION 26

4.1 Die Filterwirkung in den Jahren 2019 und 2020 (Diskussion) 26

4.1.1 PFBA-Bindung der Aktivkohlefüllungen A, B, C, D als 1. und 2. Filter (Diskussion) 27

4.1.2 PFBA-Bindung der Füllungen A, B, C, D bis zu verschiedenen Rohwasserkonzentrationen (Diskussion) 28

4.1.3 Weitere Aspekte zur Aktivkohlefilterung (Diskussion) 29

4.2 Kontrolle der Verkeimung – Mikrobiologische Untersuchungen (Diskussion) 30

4.3 Kosten (Diskussion) 31

5 ZUSAMMENFASSUNG 32

6 LITERATUR 34

7 ANHANG 35

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 Kenndaten der Bewässerungsanlage und des Anbaus 2019 und 2020 9

Tab. 3-1 PFBA-Bindung (in mg je Filter = 3 m³) der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bei vollständiger Beladung 17

Tab. 3-2 PFBA-Bindung (mg/m³) der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bei vollständiger Beladung (siehe auch Abb. 3-5 unten) 17

Tab. 3-3 PFBA-Bindung (mg) der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter (je Füllung 3 m³) 18

Tab. 3-4 PFBA-Bindung der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter (je 1 m³) 19

Tab. 3-5 Hygienisch-mikrobiologische Klassifizierung des Wassers verschiedener Probenahmestellen in den Jahren 2019 und 2020 23

Tab. 3-6 Kalkulation jährlicher Kosten bei einer gereinigten Wassermenge von 30.000 m³ 24

Tab. 7-1 Temperatur (°C in 2 m Höhe) und Niederschlag (mm) 2019 und 2020 (Wetterstation Sinzheim) 35

Tab. 7-2 PFBA-Zufuhr, -Bindung und -Durchlass der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D, E getrennt nach Filterposition (in mg, Füllung bestehend aus 3 m³ Aktivkohle) 35

Tab. 7-3 Wasserdurchsatz in m³ (kumuliert) und PFC-Konzentrationen im Jahr 2019: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter 36

Tab. 7-4 Wasserdurchsatz in m³ und PFC-Konzentrationen im Jahr 2020: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter/ 1. Tabellenabschnitt 37

Tab. 7-5 Wasserdurchsatz in m³ und PFC-Konzentrationen im Jahr 2020: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter/ 2. Tabellenabschnitt 38

Tab. 7-6 Wasserdurchsatz in m³ und PFC-Konzentrationen im Jahr 2020: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter/ 3. Tabellenabschnitt 39

Tab. 7-7 Wasserdurchsatz m³, PFBA-Konzentrationen (µg/l), Frachten und Bindung (mg): Rohwasser/ 1. Filter/ 2. Filter (zu Bindung siehe auch Tab. 7-2, S. 35) 40

Tab. 7-8 Hygienisch-mikrobiologische Klassifizierung und Anwendungsbedingungen von Bewässerungswasser (PFLEGER, I (2010) und DIN 19650 (1999)) 41

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 PFC-Grundwassermodell und Lage des Projekt-Brunnens (Nr. 20/ GWDB-Nr. 2108/211-3) Übersicht Summe PFC µg/l – Oberer Grundwasserleiter (OGWL) 2

Abb. 2-1 Monatliche Niederschlagsmengen (mm) und Durchschnittstemperaturen (°C in 2 m Höhe) der Wetterstation Sinzheim 2019 und 2020 4

Abb. 2-2 Pilotanlage Foto: von links – Pumpenaggregat, 3 Filter, Wasserspeicher (Foto: Züblin/ Edel, H.-G.) 6

Abb. 2-3 Pilotanlage Schema: Komponenten/ Einbindung in das Bewässerungssystem 7

Abb. 2-4 Gefilterte Wassermenge im Projektzeitraum 2019 bis 2020 (m^3/Tag) 8

Abb. 3-1: Konzentrationen (µg/l) an PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA und PFOA im Rohwasser in den Jahren 2019 und 2020 12

Abb. 3-2 PFC-Konzentrationen im Rohwasser und im zeitlichen Verlauf nach 1. Filter 2019; kumulierter Wasserdurchsatz in m^3 13

Abb. 3-3 PFC-Konzentrationen im Rohwasser und im zeitlichen Verlauf nach 1. Filter und 2. Filter 2020; kumulierter Wasserdurchsatz in m^3 14

Abb. 3-4 Wasserdurchsatz (m^3 in Tsd.) und PFBA-Bindung (mg) der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D im Projektzeitraum 2019 und 2020 15

Abb. 3-5 PFBA-Bindung (mg/m^3) der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bei ca. vollständiger Beladung und je Filterplatz (siehe auch Tab. 3-2 oben) 18

Abb. 3-6 PFBA-Bindung (mg/m^3) der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter (siehe auch Tab. 3-4 oben) 19

Abkürzungen

4:2 FTS	4:2 Fluortelomersulfonsäure
6:2 FTS	6:2 Fluortelomersulfonsäure
8:2 FTS	8:2 Fluortelomersulfonsäure
AfA	Absetzung für Abnutzung
BG	Bestimmungsgrenze
d	day(s)
DOC	Dissolved organic carbon/ gelöster organischer Kohlenstoff
Ek	Eignungsklasse(n)
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwerte
GWDB-Nr	Grundwasserdatenbank-Nr.
GWM	Grundwassermodell LUBW
o. g.	Oben genannt
OGWL	Oberer Grundwasserleiter
QS LW	Quotientensumme auf Basis Leitwerte (Trinkwasser)
LRA	Landratsamt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
MLR	Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFDA	Perfluordecansäure
PFDoDA	Perflurdodecansäure
PFDS	Perfluordecansulfonsäure
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (Synonym für PFC)
PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien (Synonym für PFAS)
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure
PFHxA	Perfluorhexansäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure
PFNA	Perfluornonansäure
PFNS	Perfluornonansulfonsäure
PFOA	Perfluoroctansäure
PFOS	Perfluoroctansulfonsäure
PFPeA	Perfluorpentansäure
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure
PFPrA	Perfluorpropansäure
PFPrS	Perfluorpropansulfonsäure
PFTeDA	Perfluortetradecansäure
PFTrDA	Perfluortridecansäure
PFUnDA	Perfluorundecansäure
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
QS	Quotientensumme
RP	Regierungspräsidium

PFAS/PFC-Pilotanlage zur Reinigung von Bewässerungswasser

1 EINLEITUNG

Als Ursache einer großflächigen PFAS/PFC-Grundwasserverunreinigung in Mittelbaden sind Kompostausbringungen zwischen 1999 und 2008 anzunehmen. Dies legt eine Fülle von Boden- und Pflanzenuntersuchungen nahe. Ausgangspunkt der Grundwasserverunreinigung ist demnach die mosaikartige Beaufschlagung landwirtschaftlich genutzter Flächen mit Kompost, der über Papierschlämme PFAS/PFC-verunreinigt war.

Die Umweltbehörden der Kreise Rastatt und Baden-Baden veranlassten die Untersuchung von 3091 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche. Dabei konzentrierten sich die Untersuchungen auf Flächen, für die ein Verdacht bestand, dass sie in den Jahren 1999 bis 2008 verunreinigten Kompost erhalten hatten. Die inzwischen ermittelte verunreinigte Fläche beläuft sich im Landkreis Rastatt und im Stadtkreis Baden-Baden zusammen auf 1215 ha (Stand Dezember 2021). Die Trefferquote der Untersuchungen beträgt damit 39 %. Die Erkundungen sind sehr weit fortgeschritten, aber noch nicht ganz abgeschlossen.

Ein Grundwassermodell (LUBW (2021)) berechnet ausgehend von den verunreinigten Böden die Grundwasserverunreinigung und wie sie sich entwickelt. Die horizontale Ausdehnung der „PFAS/PFC-Fahnen“ in Abb. 1-1, S. 2 erstreckt sich über ca. 7.500 – 8.000 ha. Berechnungen gehen von 130 Millionen Kubikmeter verunreinigtem Grundwasser aus (KASPRYK, O. & RODRIGUEZ, L. (2020)).

Die Nutzung zahlreicher Bewässerungsbrunnen leidet unter der Grundwasserverunreinigung, die in den Bodenverunreinigungen ihre Ursache hat. In nicht wenigen Fällen ist der Brunnenbetrieb nicht mehr zugelassen. Maßstab für Einschränkungen, Unterbindung oder gänzliche Freigabe von Bewässerungsmengen ist die sogenannte Quotientensumme (QS) des Bewässerungswassers. In diesen Summenparameter fließen die Grenzwerte (=Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS)) für mehrere PFAS/PFC-Verbindungen ein. Anpassungen dieser GFS-Werte hatten bei einigen Brunnen im Jahr 2019 höhere QS zur Folge. Im ungünstigsten Falle war nach der Neuberechnung eine Bewässerung nicht mehr möglich (RP Karlsruhe (2018)). Dieser Art betroffen war auch der Pilotprojekt-Betrieb.

<Fremde Textinhalte sind im Folgenden mit Quellenangabe wie dieser Satz gekennzeichnet.>
Außer in der Zusammenfassung verwendet der folgende Text für „PFAS“ nur die synonyme Abkürzung „PFC“.

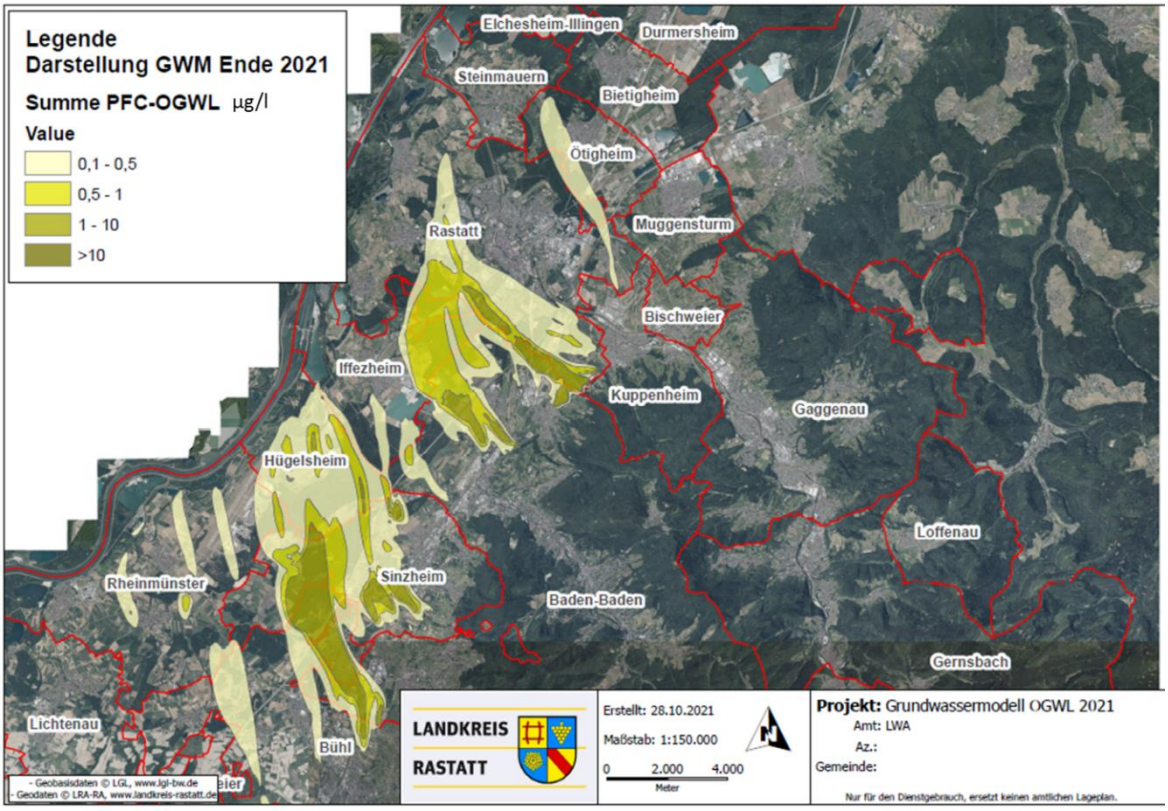


Abb. 1-1 PFC-Grundwassermodell und Lage des Projekt-Brunnens (Nr. 20/ GWDB-Nr. 2108/211-3) Übersicht Summe PFC µg/l – Oberer Grundwasserleiter (OGWL)

1.1 Problemstellung

Rentabel sind Bewässerungsmaßnahmen derzeit nur bei Sonderkulturen wie Gemüse, Erdbeeren oder landwirtschaftlichen Spezialkulturen (Saatmais, Topinambur). Ohne Bewässerung lassen sich diese Produktionsrichtungen im Klima des Oberrheintals – vielfach auf sandigen Böden – nicht aufrechterhalten.

Um der PFC-Verunreinigung im Bewässerungswasser zu entgehen, verlegen die Bewirtschafter lange Zuleitungen, bohren, sofern zulässig, neue Brunnen und verlagern, wenn möglich, ihre Produktionsflächen aus dem verunreinigten Grundwasserbereich. Diese Maßnahmen begegnen der PFC-Problematik jedoch nur sehr unzureichend und aufwändig. Manche Lösungsansätze sind nicht erschwinglich oder standortbedingt nicht möglich.

Grundsätzlich ist es möglich, das Problem der PFC-Verunreinigung von Bewässerungswasser mit Aktivkohlefiltern zu lösen. Drei kleinmaßstäbliche Pilotanlagen im Jahr 2016 im Zuständigkeitsbereich des Landwirtschaftsamts Rastatt zeigten dies (finanziert von Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR)). Bis jetzt blieb un-

geklärt, ob und wie eine solche Reinigungsanlage im Alltag eines größeren Gemüsebaubetriebs funktioniert. Dies zu klären, war Ziel des hier vorgestellten Pilotprojekts. Installation und Betreiben einer Pilotanlage ist – zumal in dieser Größe – immer ein Risiko und auch bei finanzieller Unterstützung mit Mehraufwendungen und Zusatzbelastungen für den Betrieb verbunden. Im Jahr 2019 fand sich dafür ein von der PFC-Problematik betroffener Sonderkulturbetrieb.

Die finanziellen Projektmittel für den Betrieb der Pilotanlage und für die Kontrolle ihrer Funktionstüchtigkeit stellte wiederum das MLR auf Antrag des Landwirtschaftsamtes Rastatt vom 27.02.2019 zur Verfügung.

1.2 Projektziele

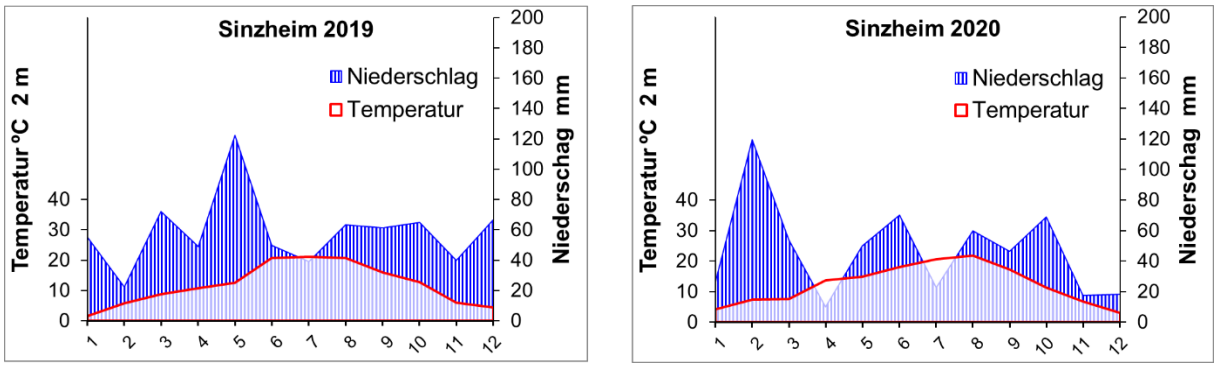
Zusammengefasst zielte das Projekt auf eine praxistaugliche PFC-Reinigungsanlage, die kurzkettige PFC-Verbindungen (kkPFC) und PFOA effektiv und ökonomisch tragbar aus dem Bewässerungswasser entfernt. Pflanzen nehmen bevorzugt die kkPFC und PFOA auf. Die Reinigungsanlage sollte einem Sonderkulturbetrieb trotz der PFC-Verunreinigung des Bewässerungswassers einen uneingeschränkten Anbau ermöglichen.

Im Einzelnen stellten sich für das Pilotprojekt folgende Fragen:

- Welche Aktivkohlemengen sind für eine Anbausaison ohne Kohletausch erforderlich?
- Wie harmoniert die Reinigungskapazität im laufenden Betrieb mit der Speicherauslegung?
- Stellen Filterverkeimungen ein Problem dar?
- Ist der Betreuungsaufwand dauerhaft zu leisten und der Wartungsaufwand akzeptabel?
- Welche Kostenstruktur ergibt sich aus dem praxisgerechten Betrieb?
- Welche Anforderungen an Bewässerungstechnik und Steuerung ergeben sich?
- Sind Anpassungen hinsichtlich Kulturarten und Kulturabfolgen erforderlich?

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Die Witterung 2019 und 2020



Quelle: Agrarmeteorologie Baden-Württemberg (Datenbestand gepflegt vom LTZ Augustenberg Karlsruhe)

Abb. 2-1 Monatliche Niederschlagsmengen (mm) **und Durchschnittstemperaturen** (°C in 2 m Höhe) **der Wetterstation Sinzheim 2019 und 2020**

Abb. 2-1 (oben) zeigt die monatlichen Niederschlagsmengen (mm) und die monatlichen Durchschnittstemperaturen (°C in 2 m Höhe) der Wetterstation Sinzheim. Diese Wetterstation Sinzheim des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums (LTZ) Augustenberg befindet sich ca. 8 km südsüdwestlich der Pilotanlage.

Temperatur- und Niederschlagsachse sind in Abb. 2-1, S. 4 im Verhältnis 1:2 skaliert. Aus Klimadiagrammen ist dann direkt optisch abzulesen, ob ca. aride oder humide Verhältnisse vorliegen (WALTER, H. (1957)). Überschreitet die Temperaturkurve (rot) die Niederschlagskurve (blau), dann deutet dies auf aride Verhältnisse hin. Demnach traten 2019 im Juli aride Verhältnisse auf, im Jahr 2020 im April und Juli. Mit diesen ariden Verhältnissen geht ein besonderer Bewässerungsbedarf einher. Dieser Bewässerungsbedarf ist außer von der Klimatischen Wasserbilanz auch von der Bodenfeuchte und den angebauten Kulturen abhängig. Im überdachten Anbau entfällt die direkte Abhängigkeit der Feuchteverhältnisse von den gezeigten Niederschlags- und Temperaturkurven. Es sind die dort herrschenden Temperaturen und die Bewässerungsgaben maßgebend – wiederum in Verbindung mit Boden- und Pflanzenverhältnissen.

2.2 Der Brunnenstandort

Der Brunnen befindet sich im Vergleichsgebiet 3 „Rheinebene“ des Landes Baden-Württemberg.

Die Pumpe fördert aus ca. 9 m Tiefe aus dem oberen Grundwasserleiter (hydrogeologisch: „Oberer Teil der Ortenau-Formation oben“). Dieser Grundwasserleiter befindet sich geologisch in der Kinzig-Murg-Rinne und liegt in einem Randzipfel der modellierten PFC-Grundwasserverunreinigung. Im Bereich des Brunnens ist eine PFC-Konzentration von 0,1 – 0,5 µg/l PFC im OGWL ausgewiesen.

2.3 Die Komponenten der Pilotanlage

Die Filtereinheit besteht aus drei Aktivkohlefiltern, denen ein Partikel-Beutelfilter vorgeschaltet ist. Jeder der drei Filter (Jahr 2019) ist mit 3 m^3 Aktivkohle befüllt.

Als Behältnisse für die Aktivkohle dienen zylindrische Druckbehälter aus Stahl (4 bar). Die drei Filtereinheiten sind in Reihe geschaltet. Die 3. Filtereinheit dient als Sicherheitsfilter für den Fall, dass die Aktivkohlefüllung des 2. Filters nicht termingerecht getauscht werden kann und es deshalb nach dem 2. Filter zu einem stärkeren Anstieg der PFC-Konzentration kommt. In jedem Filterkopf sorgt eine Verteilvorrichtung für eine möglichst gleichmäßige Durchströmung des Filterkörpers.

Die Bauhöhe der Filter beträgt 3,7 m. Es handelt sich um Standardfilter für die Wasserreinigung. Um Behälter mit über 3 m Höhe aufstellen zu können, ist eine Baugenehmigung erforderlich. Denn es handelt sich nach Landesbauordnung (Anlage zu § 50 LBO) nicht um ein „Verfahrensfreies Vorhaben“. Für die hier verwendeten Filter ist eine betonierte Standfläche notwendig.

Im Jahr 2020 waren nur zwei Filter mit je 3 m^3 Aktivkohle im Einsatz. Dies ist nach den Erfahrungen aus dem Jahr 2019 ausreichend.

Abb. 2-2 Pilotanlage Foto: von links – Pumpenaggregat, 3 Filter, Wasserspeicher (Foto: Züblin/ Edel, H.-G.)

Der Filtereinheit vorgeschaltet ist eine Unterwasserpumpe, welche die Filtereinheit möglichst kontinuierlich beschickt. Bei vollem Speicher schaltet eine vom Betriebsleiter entworfene und auf dem Speichersack installierte Lichtschranke diese Pumpe ab. Die Leistung von Unterwasserpumpe und Filterkapazität ist auf eine gereinigte Wassermenge von maximal 12 m^3/h abgestimmt. Dieser Durchsatz ist nicht darauf ausgelegt, Spitzenbedarfe zu decken. Dies wäre nicht wirtschaftlich. Um Spitzenbedarfe zu decken, schließt sich der Filtereinheit ein 500 m^3 fassender sackartiger Speicher aus Polyethylen an (siehe Abb. 2-2, oben). Das Behältnis ist vollständig geschlossen, sodass anders als bei offenen Speichern Verschmutzungen von außen nicht zu befürchten sind. Der Speichersack liegt auf planierter Fläche mit Vliesabdeckung und 10 cm Sandschicht. Das Fassungsvermögen von 500 m^3 entspricht 50 mm oder 50 l/m^2 für 1 ha. Aus diesem Wasserspeicher speist eine Pumpe mit einer Förderleistung von 90 m^3/h das gereinigte Wasser in das Bewässerungsnetz des Betriebes.

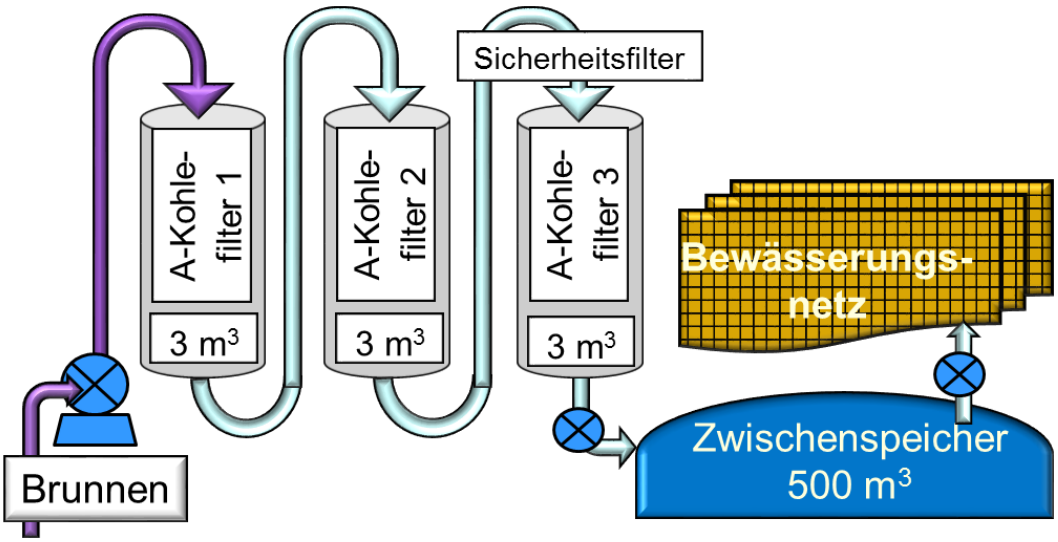


Abb. 2-3 Pilotanlage Schema: Komponenten/ Einbindung in das Bewässerungssystem

2.4 Die Aktivkohle

Zum Einsatz kommen je Filter 3 m³ sog. hochaktivierte, agglomerierte Kornaktivkohle (Steinkohle) geliefert von Fa. Züblin – Bezeichnung PFAS optima® (Wortmarke Züblin seit 27.01.2020). <Dieser Kohletyp ist für die Abreinigung reiner PF-Carbonsäuren geeignet, die im Brunnenwasser des Pilotbetriebs vorkommen. Dies zeigten schon bestehende Filteranlagen im Raum Rastatt. Für PF-Carbonsulfonsäuren, die im Grundwasser der Region teils auch vorkommen, ist dieser Kohletyp ebenfalls geeignet. Um Aussagen über die PFC-Bindekapazität der Kohle machen zu können, sind Untersuchungen des Rohwassers insbesondere auf gelösten organischen Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon (DOC)), Eisen- und Manganionen und ggf. auch auf Kohlenwasserstoffe erforderlich. Diese Stoffe beeinträchtigen die PFC-Bindeleistung je nach ihrer Konzentration erheblich. DOC beispielsweise, das mit PFC um Bindeplätze konkurriert, kommt häufig in ppm-Konzentrationen im Grundwasser vor; PFC häufig in ppb-Konzentrationen (Protokoll Besprechung Pilotanlage am 07.11.2019/ Info Züblin; Dr. Edel).>

<Die beladene Aktivkohle ist reaktivierbar: Eine erste Trocknung lässt bei 120°C Wasser und niedrig siedende Schadstoffe verdampfen und eine weitere Temperaturerhöhung auf 450°C führt zur Desorption flüchtiger Schadstoffe. Anschließend pyrolisieren bei 600°C höher siedende organische Schadstoffe und verbrennen teilweise. Eine Nachverbrennung bei über 1400°C zerstört PFC. Saure Abgase wie Chlorwasserstoff und Fluorwasserstoff werden im Wege einer Abgaswäsche entfernt. Beim Reaktivierungsprozess gehen 10 – 15 % der Aktivkohle durch Verbrennen verloren. Diese werden durch frische Aktivkohle ersetzt. Zusammengefasst: Es entstehen bei der Reinigung PFC-haltigen Wassers mit Aktivkohle keine entsorgungspflichtigen PFC-haltigen Reststoffe. Zu-

dem ist das Betriebsmittel größtenteils wieder verwendbar. (Protokoll Besprechung Pilotanlage am 07.11.2019/ Info Züblin; Dr. Edel)>

2.5 Kenndaten der Anlage und ihres Einsatzes 2019 und 2020

Die Förderleistung der zuführenden Unterwasserpumpe (12 m^3/h) und die Aktivkohlemenge (6 m^3) führen zu einer Verweilzeit des Rohwassers im Filterkörper von mindestens 0,5 h.

Die tatsächlich gereinigte Wassermenge erreichte im Mittel der beiden Projektjahre ca. 50 % der maximal möglichen gereinigten Wassermenge bei Dauerbetrieb. (2019 43 %; 2020 60 %). Mit 60 % des theoretischen Maximalwerts ist die Anlage im Jahr 2020 gut ausgelastet.

Filtertausch bedeutet immer, dass der 2. Filter an die Position des 1. Filters rückt. Dies geht immer auch einher mit der Neubefüllung des vollbeladenen 1. Filters einher.

In die Zeitspanne vom 1. Filtertausch (02.06.) bis zum 2. Filtertausch (09.09.) fällt eine Fehlfunktion des Wasserzählers vom 27.05. bis 06.07. (Tausch des Wasserzählers am 06.07.2021). Der Wasserzähler zählte falsch oder nicht. Für diesen Zeitraum sind die gefilterten Wassermengen mit täglich 150 m^3/Tag berechnet (Abb. 2-4 unten). In den ersten beiden Augustwochen 2020 war die Maximalleistung der Anlage (288 m^3/d) mit 277 m^3/d nahezu ausgeschöpft.

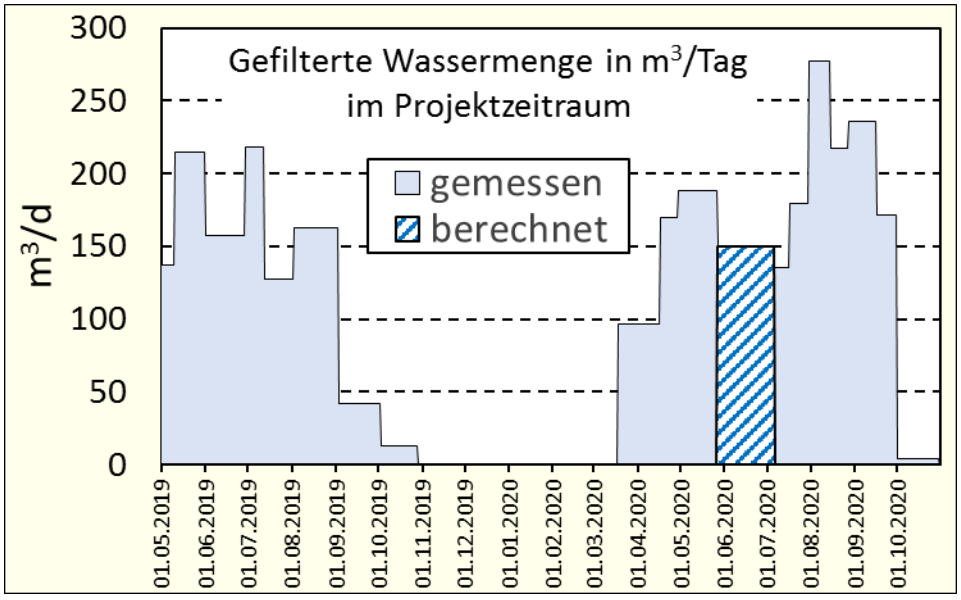


Abb. 2-4 Gefilterte Wassermenge im Projektzeitraum 2019 bis 2020 (m^3/Tag)

Tab. 2-1 Kenndaten der Bewässerungsanlage und des Anbaus 2019 und 2020

	Reinigung Maximale Wassermenge	Einsatz 2019	Einsatz 2020
m^3/h	12	5,2	7,2
Mittlere Verweilzeit bei 6 m^3 Aktivkohle	0,5 h	1,15 h	0,83 h
m^3/d	288	125	174
m^3/180 d	52.000	-	-
m^3/Saison	-	22.375	34.278
Saison Tage = d	-	179	197
Mittlere Auslastung/d	-	43 %	60 %
Fläche ca. ha	-	13,8	15,3
mm od. l/m^2	-	162	224
Tropf / über Kopf	-	90 % / 10 %	80 % / 20 %
Tunnel / Freiland ca.	-	2 ha / 11,8 ha	2 ha / 13,3 ha
Erd-/Strauchb./Gemüse ca.	-	5 ha / 2 ha / 6,8 ha	5 ha / 2 ha / 8,3 ha

2.6 Kontrolle der Filterleistung und Berechnung der PFBA-Bindung

Die Verunreinigung des Rohwassers und die Bindekapazität einer Aktivkohle-Füllung bestimmen, wie lange das gefilterte Wasser PFC-frei bleibt. Die Bindekapazität eines jeden Filters hängt ab von der Menge der Aktivkohle (hier 3 m^3/Filter) und deren Bindekapazität. Die Bindekapazität speziell für PFC hängt außerdem von weiteren bindenen Substanzen im Wasser (insbesondere DOC) ab.

Regelmäßige Untersuchungen des Rohwassers und des gefilterten Wassers geben Aufschluss über die Beladung der einzelnen Filter und die Funktionstüchtigkeit der Anlage im Laufe ihres Betriebs. Derzeit ist amtlich vorgegeben, dass die Bewässerungsmengen ab einer Quotientensumme (QS) >= 1 eingeschränkt werden müssen. Bei einer QS > 3,5 ist keine Bewässerung mehr erlaubt. In der zweijährigen Pilotphase ist nahezu PFC-freies Wasser im Bewässerungsnetz angestrebt (QS = 0).

Ein Wasserzähler (magnetisch induktiver Durchflussmesser) misst die aus dem Grundwasser und durch die Filter gepumpte Wassermenge. Zusammen mit den Ana-

lysewerten sind damit Mengenberechnungen zur PFC-Fracht des Rohwassers und zur PFC-Bindung der Filterfüllungen möglich. Tab. 7-3ff, S. 36ff im Anhang enthält alle Analysewerte.

Den Berechnungen zur PFBA-Bindung der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D liegen die Rohwasserkonzentrationen, die Konzentrationen nach 1. und 2. Filter und der mittels Wasserzähler gemessene Wasserdurchsatz (m^3) zugrunde. Von 27.05.2020 bis 06.07.2020 zeichnete der Wasserzähler falsch auf oder fiel ganz aus. Der Wasserzähler wurde am 06.07.2020 getauscht. Für diesen Zeitraum unsicherer Verbrauchsmessung liegt den Berechnungen ein täglicher Wasserverbrauch von 150 m^3 zugrunde – abgeleitet aus den Verbräuchen vor und nach dem Ausfall des Wasserzählers und aus den Mitteilungen des Betriebsinhabers (siehe auch Abb. 2-4, S. 8).

2.7 Filterbefüllung und Wechsel der Filterreihenfolge

Jahr 2019: Der 1. Filter mit Füllung A ist bis Oktober 2019 in Betrieb.

Jahr 2020: Im darauffolgenden Frühjahr 2020 wird der 2. Filter mit seiner teilbeladenen Füllung B zum ersten Filter. Der 3. (Sicherheits-)Filter mit Füllung C nimmt jetzt die Stelle des 2. Filters ein. Dieser 3. Filter ist noch nicht mit PFC beladen, denn das Wasser nach dem 2. Filter weist bis zum 28.10.2019 so gut wie kein PFC auf. (Tab. 7-7, S. 40, Zellen R9-10, Durchlass des 2. Filters insgesamt 3 mg PFBA von 660 mg aufgenommener PFBA.) Dies zeigte auch, dass ein 3. Filter hier nicht notwendig ist, weshalb die Anlage fortan mit lediglich zwei Filtern betrieben wurde.

Ist der zum 1. Filter gewordene Filter mit Füllung B vollständig beladen, dann wird diese Füllung B durch die frische Füllung D ersetzt (02.06.2020). Der 2. Filter mit Füllung C ist jetzt teilbeladen und rückt an die Stelle des 1. Filters. Der Filter mit der frischen Füllung D wird zum 2. Filter.

Der Filter mit der Füllung C am 1. Filterplatz ist dann am 09.09.2020 vollständig beladen, sodass diese vollbeladene Füllung C gegen eine frische Füllung E ausgetauscht wird. Der 2. Filter mit der inzwischen teilbeladenen Füllung D kommt jetzt auf den 1. Filterplatz. Am 2. Filterplatz steht der Filter mit der frischen Füllung E.

2.8 Kontrolle der Verkeimung – Mikrobiologische Untersuchungen

Aufgrund der bekannten allgemeinen Grundwasserbeschaffenheit waren Untersuchungen auf chemische Parameter mit Toleranzbereichen nach PFLEGER (2010) nicht erforderlich (z. B. Schwermetalle).

<Der direkte Kontakt von Wasser und Mensch ist beim Bewässern nur in Ausnahmefällen gegeben. Deshalb sind die Qualitätsanforderungen an Trinkwasser und Bewässerungswasser nicht identisch. Als Verschmutzungsindikatoren dienen Fäkalstreptokokken (= Enterokokken) und Escherichia coli. Beide sind selbst nicht pathogen. Jedoch ist mit pathogenen Keimen im Wasser zu rechnen, wenn sie in hoher Zahl vorkommen. Salmonellen dürfen im Bewässerungswasser nicht nachweisbar sein. Die bakteriologischen Kriterien dienen dazu, Bewässerungswasser in 4 Eignungsklassen (Ek) einzuteilen (Tab. 7-8, S. 41). (PFLEGER, I. (2010)).> Diese Einteilung basiert auf der DIN 19650 aus dem Jahr 1999. Ek 1 entspricht Trinkwasserqualität. Wasser der Ek 2 kann eingesetzt werden bei allen Bewässerungsarten und bei allen Fruchtarten zum Rohverzehr.

Aufschluss über eine Verkeimung und gegebenenfalls über den Verlauf einer Verkeimung im Filter- und Speichersystem der Pilotanlage geben Beprobungen vor Winter 2019 und im Frühjahr 2020 vor dem Beginn der Bewässerungssaison.

Die Probenahmestellen 2019 vor Winter: Rohwasser, nach 1. Filter, nach 2. Filter. Die Probenahmestellen 2020 vor der Bewässerungssaison: Rohwasser, nach 1. Filter, nach 2. Filter, nach Speichersack. Der 1. Filter im Jahr 2020 mit Füllung B und der 2. Filter mit Füllung C hatten zum Beprobungszeitpunkt 2020 in abgelassenem Zustand überwintert. (Im Jahr 2019 hatte die Füllung B im 2. Filter schon eine gewisse PFBA-Menge gebunden. Die Füllung C befand sich im 3. Sicherheitsfilter. Diese Füllung musste nahezu kein PFC binden, da der 2. Filter mit Füllung B die PFBA fast vollständig herausreinigte.)

Die Untersuchung erfolgte im Jahr 2019 auftragsgemäß nach Trinkwasserverordnung (einschließlich Pseudosomonas aeruginosa und Enterokokken), im Jahr 2020 zusätzlich auf Salmonellen.

3 ERGEBNISSE

3.1 Die PFC-Konzentrationen im Rohwasser in den Jahren 2019 und 2020

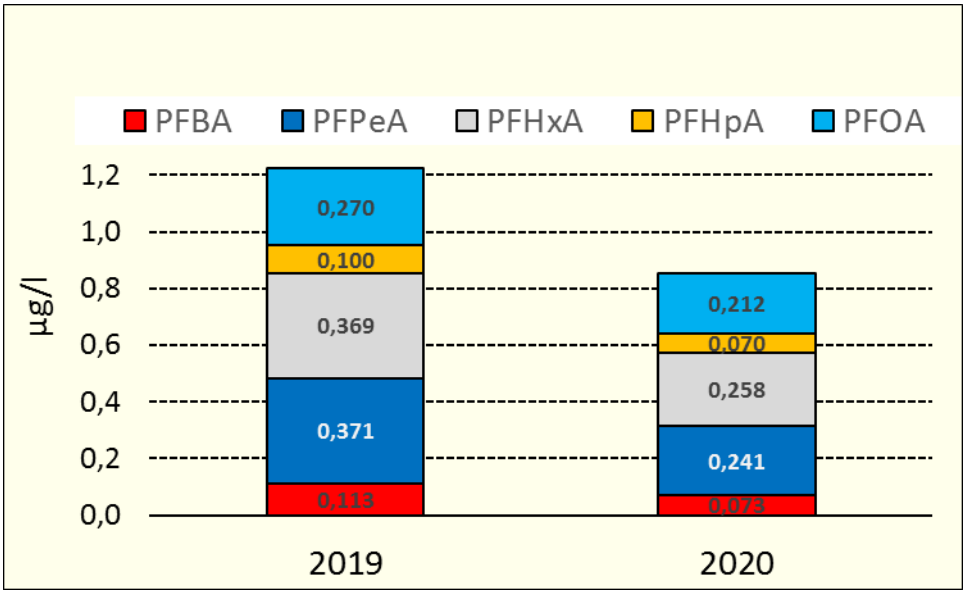


Abb. 3-1: Konzentrationen (µg/l) **an PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA und PFOA im Rohwasser in den Jahren 2019 und 2020**

Abb. 3-1 (oben) zeigt die PFC-Konzentrationen im Rohwasser der Jahre 2019 und 2020. Die angegebenen Konzentrationen sind im Jahr 2019 Mittelwerte aus 5 Probenahmen im Jahresverlauf, im Jahr 2020 Mittelwerte aus 6 Probenahmen. Tab. 7-3, S. 36 im Anhang enthält alle Einzelwerte dieser Messungen und das Datum der Probenahmen. Andere PFC-Verbindungen kommen nur ausnahmsweise und in Konzentration nahe der Bestimmungsgrenze (0,001 µg/l) vor.

PFBA, für welche die Aktivkohle die geringste Bindekapazität aufweist, weist im Jahr 2019 eine Konzentration von durchschnittlich 0,113 µg/l auf. In annähernd gleicher Konzentration kommen PFPeA und PFHxA mit ca. 0,37 µg/l vor. Die Konzentration von PFPHpA beträgt 0,1 µg/l. Die Konzentration von PFOA, der einzigen langkettigen PFC-Verbindung, liegt bei 0,27 µg/l.

Die Durchschnittskonzentration für PFBA beträgt im Jahr 2020 0,073 µg/l. Die Anteile der oben genannten 5 PFC-Verbindungen sind im Jahr 2020 fast gleich wie im Jahr 2019. Die Summe der PFC-Verbindungen ist 2020 jedoch auf 70 % des Vorjahreswertes gesunken. (Summe PFC Verbindungen 2020 0,85 µg/l – Summe 2019 1,22 µg/l).

3.2 Die Filterwirkung im Verlauf der Jahre 2019 und 2020

Abb. 3-2, unten zeigt die durchschnittlichen Rohwasserkonzentrationen der 5 PFC-Verbindungen in Kap. 3.1, S. 12 und die Filterwirkung im Jahr 2019.

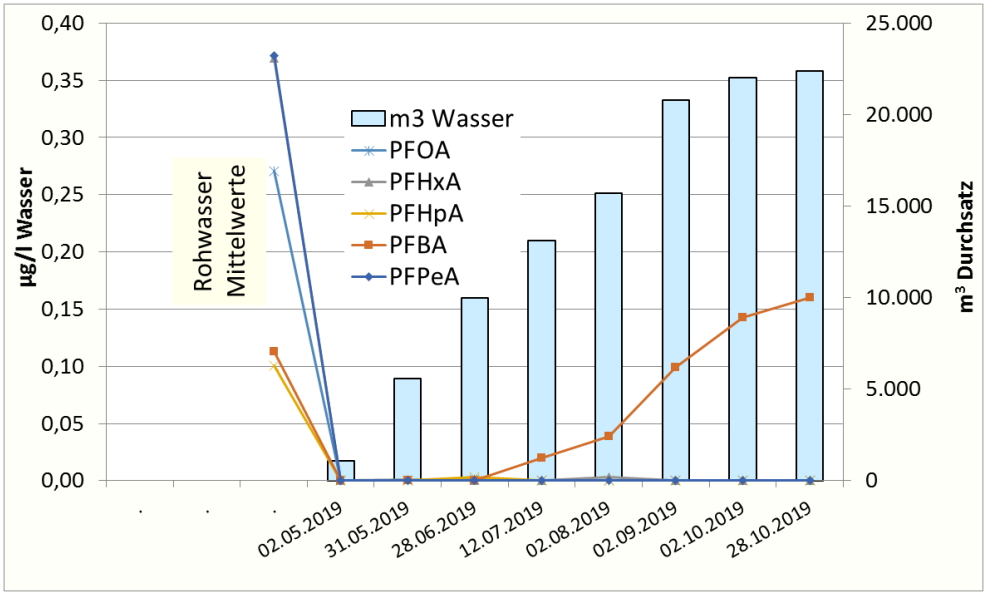


Abb. 3-2 PFC-Konzentrationen im Rohwasser und im zeitlichen Verlauf nach 1. Filter 2019; kumulierter Wasserdurchsatz in m³

Die kurzkettige PFBA mit 0,112 µg/l im Rohwasser bricht als erste durch den Aktivkohlefilter. Der Durchbruch findet zwischen einem Durchsatz von 10.000 und 13.000 m³ statt. Am 12.07.2019 (nach 13.000 m³ Durchsatz) sind nach dem 1. Filter (Füllung A) 0,02 µg/l PFBA messbar. (Siehe auch Tab. 7-7, S. 40) Eine Filterwirkung ist noch bis zu einem Durchsatz von ca. 21.000 m³ festzustellen (02.09.2021). Danach steigt die PFBA-Konzentration nach dem 1. Filter über den Rohwasserwert.

Bei ca. 22.000 m³ Durchsatz – am 02.10.2019 – bricht auch der 2. Filter (Füllung B) mit PFBA durch. (Tab. 7-7, S. 40, Zelle P9).

Abb. 3-3 unten zeigt analog zu Abb. 3-2, oben (Jahr 2019) die durchschnittliche Rohwasserkonzentration und die Filterwirkung im Jahr 2020.

Der 2. Filter mit Füllung B hat bis zum Saisonende 2019 vom 1. Filter 660 mg PFBA erhalten (Tab. 7-2, S. 35). Davon hat er nur 3 mg durchgelassen, die in den 3. Filter mit Füllung C gelangten. Deshalb ist dieser 3. Filter mit Füllung C am Saisonende so gut wie nicht mit PFBA beladen. Zu Beginn des Jahres 2020 wird der teilbeladene 2. Filter (Füllung B) aus dem Jahr 2019 zum 1. Filter. Der nahezu unbeladene 3. Filter (mit Füllung C) aus dem Jahr

2019 wird zu Beginn des Jahres 2020 zum 2. Filter. Ein 3. Filter ist nach den Erfahrungen 2019 im Jahr 2020 nicht nötig.

Die höchste PFBA-Konzentration im Wasser, das nach dem 2. Filter 2020 ins Bewässrungsnetz gelangte, beträgt 0,019 µg/l PFBA (blaue Kurve in Abb. 3-3 unten). Die Quotientensumme dieses Wasser gibt der Untersuchungsbericht des Labors mit 0,00 an.

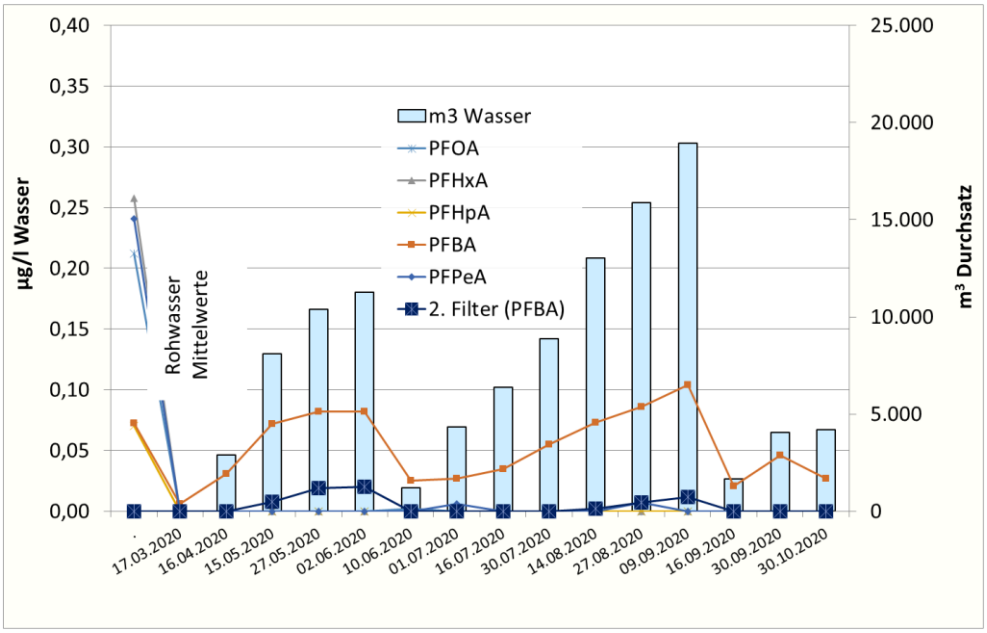


Abb. 3-3 PFC-Konzentrationen im Rohwasser und im zeitlichen Verlauf nach 1. Filter und 2. Filter 2020; kumulierter Wasserdurchsatz in m³

3.3 PFBA-Bindung der Aktivkohlefüllungen A, B, C, D als 1. und 2. Filter

Eine Übersicht über die PFBA-Bindung der Aktivkohlefüllungen A, B, C und D in Position des 1. und des 2. Filters zeigt Abb. 3-4, S. 15. Dieser Abb. 3-4 ist zu entnehmen, dass die Füllung A ca. 1900 mg PFBA gebunden hat, Füllung B 1300 mg, Füllung C 900 mg und Füllung D 1200 mg (jeweils bis zum Filtertausch). Die genauen Angaben enthält Tab. 3-1, S. 17. Die Bindeleistung ist immer berechnet vom Beginn der Beschickung des unbeladenen Filters bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Konzentration nach Filter dem Rohwasser entspricht. Dann ist die maximale Bindeleistung bei der jeweiligen Rohwasserkonzentration ausgeschöpft. Tab. 7-2, S. 35 enthält ergänzend zu Tab. 3-1, S. 17 auch die aufgenommenen PFBA-Frachten und die durchgelassenen PFBA-Mengen.

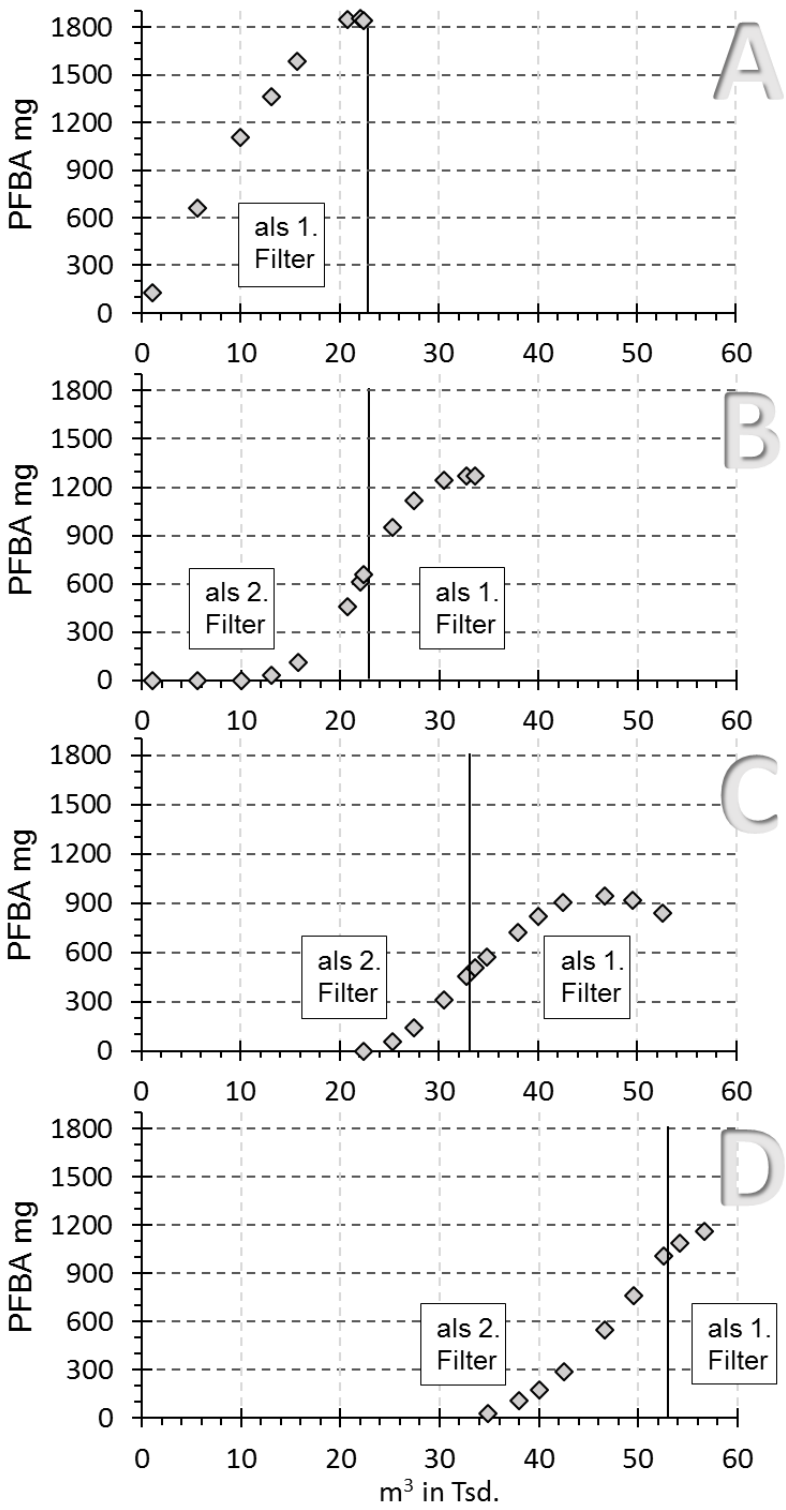


Abb. 3-4 Wasserdurchsatz (m^3 in Tsd.) **und PFBA-Bindung** (mg) **der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D im Projektzeitraum 2019 und 2020**

Tab. 3-1, S. 17 basiert auf Tab. 7-7, S. 40 im Anhang, die Einzelwerte, Berechnungsergebnisse und Zeitpunkte der Probenahmen enthält.

Die Werte in Tab. 3-1 S. 17 sind ohne die (geringen) Desorptionsmengen angegeben, die einem verzögerten Füllungsaustausch geschuldet sind. Es sind somit die maximal gebundenen PFBA-Mengen der Füllungen A, B, C, D. Die Konzentrationen am Filterauslass bei vollständiger Beladung der Füllungen sind ebenfalls aufgeführt. Sie betragen 0,099/ 0,082/ 0,073/ 0,046 µg/l PFBA bei den Füllungen A/ B/ C/ D. (Füllung D fast vollständig beladen.)

Der 1. Filter mit Füllung A bindet bis zu seiner vollen Beladung 1851 mg PFBA. Sein Durchbruch zwischen 10.000 und 13.000 m^3 führt bis Saisonende (28.10.2021) zu einer Teilbeladung des 2. Filters (Füllung B) mit 657 mg PFBA. Die Frachtzufuhr aus dem durchgebrochenen 1. Filter beläuft sich auf 660 mg. 3 mg PFBA konnte der 2. Filter mit Füllung nicht binden. In das Bewässerungsnetz gelangt dennoch kein PFC, da im Jahr 2019 auf den 2. Filter noch ein 3. Filter folgt (Füllung C).

Im Folgejahr 2020 rückt der 2. Filter aus 2019 mit Füllung B an die Position des 1. Filters. In dieser 1. Filterposition bindet er 2020 nochmals 614 mg PFBA bis zum Filtertausch am 02.06.2020. Die gefilterte Wassermenge seit Bewässerungsbeginn im Frühjahr 2020 beläuft sich bis zu diesem Zeitpunkt auf ca. 11.000 m^3.

Der 2. Filter (Füllung C) hat zum Zeitpunkt des Filtertausches am 02.06.2020 509 mg PFBA gebunden. (Es handelt sich um den unbeladenen 3. Filter aus dem Jahr 2019.) Am 02.06.2020 wechselt dieser 2. Filter (Füllung C) an die Position des 1. Filters. Der Filter in 2. Position ist mit einer neuen Aktivkohlefüllung D befüllt.

Bis zum nächsten Filtertausch am 09.09.2021 vergehen etwas mehr als 3 Monate. Seit dem Filtertausch am 02.06.2020 sind ca. 18.000 m^3 durch die Filter geflossen. Der 1. Filter mit Füllung C hat nochmals 433 mg PFBA gebunden. Der Zustand „PFBA-Rohwasserwert gleich PFBA-Wert nach dem 1. Filter“ war schon bei ca. 13.000 m^3 erreicht. Die Wasserprobe am 09.09.2021 weist auf PFBA-Verdrängung aus dem 1. Filter hin: Die PFBA-Konzentration nach dem 1. Filter liegt jetzt über der PFBA-Rohwasserkonzentration. (Tab. 7-7, S. 40 Zelle L29).

Der 2. Filter mit Füllung D hat seit dem letzten Filtertausch am 02.06.2020 bis zum 09.09.2020 insgesamt 1008 mg PFBA gebunden. Er rückt jetzt an die 1. Filterposition und bindet dort bis zum Saisonende nochmals 159 mg PFBA. Damit ist der Austauschzeitpunkt auch schon der Füllung D herangerückt (30.10.2020), obwohl nach Filter erst 0,046 µg/l PFBA gemessen werden: Die Rohwasserkonzentration an PFBA ist inzwischen auf 0,064 µg/l gesunken (2019 im Mittel 0,113 µg/l). Wie aus Abb. 3-4 Teildiagramm D, S. 15 abzuleiten ist, besteht noch eine geringe Bindekapazität von maximal ca. 200 mg PFBA.

Der 2. Filter ist frisch befüllt mit Aktivkohle Füllung E, die bis Saisonende 2020 insgesamt 116 mg PFBA bindet (Tab. 7-2, S. 35). Nach dem 2. Filter mit Füllung E ist noch kein PFC bestimmbar. Für Füllung E lässt sich somit noch keine Bindekapazität angeben.

Alle Angaben enthalten Tab. 3-1, S. 17, Tab. 7-2, S. 35 und Tab. 7-7, S. 40.

Nach Jahren berechnet ergeben die genannten Bindungsmengen für das Jahr 2020 eine PFBA-Bindung je m^3 Aktivkohle von 363 mg, für das Jahr 2019 eine Bindung von 557 mg/m^3 Aktivkohle. Diesen Zahlen liegt im Jahr 2020 eine gereinigte Wassermenge von 34.000 m^3 mit einer durchschnittlichen PFBA-Rohwasserkonzentration von 0,073 µg/l zugrunde. Im Jahr 2019 sind es 22.000 m^3 mit einer PFBA-Konzentration im Rohwasser von 0,113 µg/l.

(Tab. 3-1, unten: Bindung Füllung A 2019 + Bindung Füllung B 2019 bezogen auf 4,5 m^3 Aktivkohle; (1851 + 657 mg)/4,5 m^3 = 557 mg/m^3; Bindung 2020 Füllung B + C + D bezogen auf 7,5 m^3 Aktivkohle: (614 + 942 +1166 mg)/7,5 = 363 mg/m^3)

Tab. 3-1 PFBA-Bindung (in mg je Filter = 3 m^3) **der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bei vollständiger Beladung**

	Füllung			
	A	**B**	**C**	**D**
Als 2. Filter	Nie in 2. Filterposition	657	509	1008
Als 1. Filter	1851	614	433	159
Summe	**1851**	**1272**	**942**	**1166**
PFBA-Konz. µg/l Filterauslass bei Vollbeladung	*0,099*	*0,082*	*0,073*	*0,046*

In Tab. 3-2, unten sind die maximalen PFBA-Mengen einer Füllung je Kubikmeter Aktivkohle angegeben. Abb. 3-5, S. 18 zeigt diese PFBA-Mengen aus Tab. 3-2 als Grafik.

Tab. 3-2 PFBA-Bindung (mg/m^3) **der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bei vollständiger Beladung** (siehe auch Abb. 3-5 unten)

	Füllung			
	A	**B**	**C**	**D**
Als 2. Filter	Nie in 2. Filterposition	219	170	336
Als 1. Filter	617	204	110	52
Summe	**617**	**423**	**276**	**388**

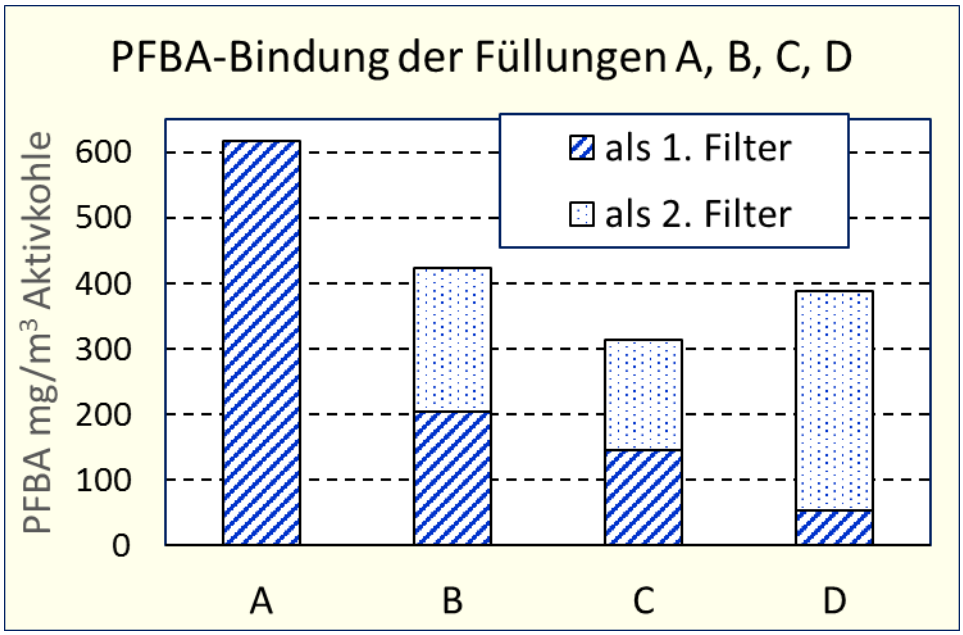


Abb. 3-5 PFBA-Bindung (mg/m³) **der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bei ca. vollständiger Beladung und je Filterplatz** (siehe auch Tab. 3-2 oben)

3.4 PFBA-Bindung der Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter

Tab. 3-3 unten enthält die PFBA-Bindungsmengen für drei Zeitabschnitte im Verlauf der Filterung für jede der 4 Füllungen A, B, C und D: 1. „bis Durchbruch", 2. „Durchbruch bis ca. 0,04 µg/l nach Filter" und 3. „Ca. 0,04 µg/l bis Vollbeladung". Tab. 3-4, S. 19 enthält dieselben Angaben bezogen auf einen Kubikmeter Aktivkohle. Diese Tab. 3-4 ist mit Abb. 3-6, S. 19 grafisch dargestellt.

In Tab. 7-7, S. 40 im Anhang sind die o. g. Abschnitte für jede Füllung mit Doppelstrichen gekennzeichnet. Die Zeitpunkte, an denen Neubefüllungen erfolgen, markieren in dieser Tabelle die roten Linien.

Tab. 3-3 PFBA-Bindung (mg) **der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter** (je Füllung 3 m³)

Füllung	**A**	**B**	**C**	**D**
PFBA mg: bis Durchbruch	1106	607	311	546
PFBA mg: Druchbr. bis ca. 0,04 µg/l nach Filter	478	506	508	617 (fast voll)
PFBA mg: Ca. 0,04 µg/l bis Vollbeladung	267	157	125	-
Summe	**1851**	**1270**	**944**	**1163**
PFBA µg/l nach Filter (voll)	*0,099*	*0,082*	*0,073*	*0,046*

Tab. 3-4 PFBA-Bindung der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter (je 1 m³)

Füllung	A	B	C	D
PFBA mg: bis Durchbruch	369	202	104	182
PFBA mg: Durchbr. bis ca. 0,04 µg/l nach Filter	159	169	169	206
PFBA mg: Ca. 0,04 µg/l bis Vollbeladung	89	52	42	-
Summe	**617**	**423**	**315**	**388**
PFBA-Konz. µg/l nach Filter (voll)	*0,099*	*0,082*	*0,073*	*0,046 (fast voll)*
PFBA-Konz. µg/l Roh-wasser bei Filter voll	*0,122*	*0,089*	*0,074*	*0,065*

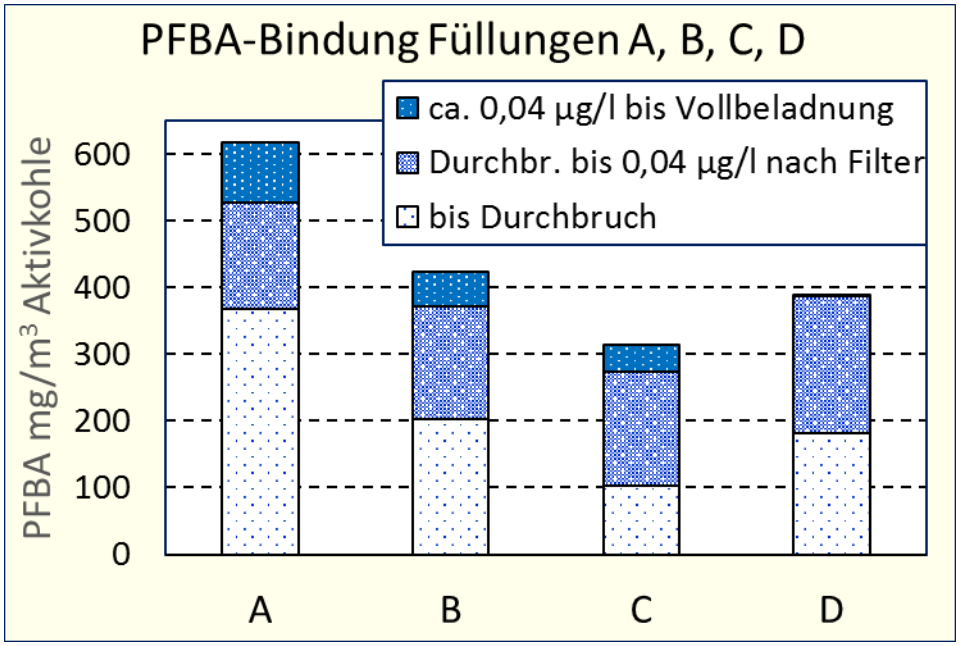


Abb. 3-6 PFBA-Bindung (mg/m³) **der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D bis zu bestimmten PFBA-Konzentrationen nach Filter** (siehe auch Tab**. 3-4** oben)

3.4.1.1 Aktivkohlefüllung A

Zwischenbilanz 1

Vom Beginn der Filterbeschickung bis zum Durchbruch:

Tab. 7-7, S. 40 zeigt, dass die Aktivkohlefüllung A des 1. Filters am 28.06.2019 noch nicht durchgebrochen ist. Der Wasserzähler steht bei 10.004 m³, zum nächsten Datum am 12.07.2019 zeigt sie 13.062 m³. Zu diesem Datum befanden sich bereits 0,02 µg/l PFBA in

der Wasserprobe nach dem 1. Filter. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Aktivkohlefüllung kurz nach einem Durchsatz von 10.000 m^3 durchbrach. Bis zu diesem Zeitpunkt hat die Füllung A 1106 mg PFBA gebunden (129 + 539 + 444 mg). Dies entspricht 368 mg PFBA/m^3 Aktivkohle von der ersten Rohwasserbeschickung bis zum Durchbruch.

Zwischenbilanz 2

Ab Durchbruch (28.06.2019) der Füllung A bis zu einer Konzentration von ca. 0,04 µg/l PFBA (0,039 µg/l) im gefilterten Wasser bindet die Füllung A weitere 478 mg PFBA (255 + 223 mg). Dies entspricht 159 mg PFBA/m^3 Aktivkohle.

Zwischenbilanz 3

Ab Zwischenbilanz 2 (ca. 0,04 µg/l) bis zu einer Konzentration von 0,099 µg/l PFBA nach Filter (02.09.2019) bindet diese Füllung weitere 267 mg PFBA. Dies entspricht 89 mg PFBA/m^3 Aktivkohle. Mit der Konzentration von 0,099 µg/l am 02.09.209 kommt die PFBA-Konzentration nach Filter der Rohwasserkonzentration von 0,122 µg/l nahe. Damit ist der Zeitpunkt zum Austausch der Aktivkohle herangerückt. Die Füllung bleibt noch bis Saisonende im 1. Filter. Somit war messbar, welche Folgen es auf die PFBA-Konzentration hat, wenn eine Füllung über den Zeitpunkt des notwendigen Austausches hinaus im Filter verbleibt.

Zwischenbilanz 1 + 2 + 3 = Gesamtbilanz

Vom Beginn der Beschickung der Aktivkohlefüllung A bis zur vollen Beladung mit PFBA summiert sich die gebundene PFBA-Menge auf 1851 mg (1106 + 478 + 267 mg). Dies entspricht 617 PFBA mg/m^3 Aktivkohle.

3.4.1.2 Aktivkohlefüllung B

Zwischenbilanz 1

Vom Beginn der Filterbeschickung bis zum Durchbruch:

Laut Tab. 7-7, S. 40 brach die Aktivkohlefüllung B ca. am 02.10.2019 durch. Zu diesem Zeitpunkt betrug die PFBA-Konzentration nach Filter 0,003 µg/l. Füllung B dient zu diesem Zeitpunkt als 2. Filter. Seit Beschickung aus dem 1. Filter bis zum Durchbruch hat Füllung B 607 mg PFBA gebunden (31 + 79 + 347 + 151 mg). Dies entspricht 202 mg PFBA/m^3 Aktivkohle.

Zwischenbilanz 2

Ab Durchbruch (02.10.2019) der Füllung B bis zu einer Konzentration von 0,04 µg/l PFBA nach Filter bindet die Füllung B weitere 506 mg PFBA (50 + 292 + 164 mg). Dies entspricht 169 PFBA mg/m^3 Aktivkohle.

Zwischenbilanz 3

Nach Zwischenbilanz 2 (0,04 µg/l PFBA nach Filter) bis zu einer Konzentration von 0,082 µg/l PFBA (27.05.2020) nach Filter bindet diese Füllung B weitere 158 mg PFBA (131 + 27 mg). Dies entspricht 52 mg PFBA/m³ Aktivkohle. Mit der Konzentration von 0,082 entspricht die PFBA-Konzentration im gefilterten Wasser fast der Rohwasserkonzentration (ca. 0,089 µg/l interpoliert). Damit war der Zeitpunkt zum Austausch der Aktivkohle herangerückt, denn die Füllung war gemessen an der Rohwasserkonzentration fast vollständig mit PFBA beladen. Der Austausch fand dann am 02.06.2020 statt.

Zwischenbilanz 1 + 2 + 3 = Gesamtbindung

Vom Beginn der Beschickung der Aktivkohlefüllung B bis zu ihrer vollen Beladung mit PFBA summiert sich die gebundene PFBA-Menge auf 1270 mg (607 + 506 + 158 mg). Dies entspricht 423 mg PFBA/m³ Aktivkohle.

3.4.1.3 Aktivkohlefüllung C

Zwischenbilanz 1

Vom Beginn der Filterbeschickung bis zum Durchbruch:

Laut Tab. 7-7, S. 40 lag die PFBA-Konzentration am 15.05.2020 bei 0,008 µg/l. Somit brach die Aktivkohlefüllung C kurze Zeit vor dem 15.05.2020 durch. Füllung C diente zu dieser Zeit als 2. Filter. In dieser Position hat die Füllung C bis zum Durchbruch 311 mg PFBA gebunden (54 + 88 + 169 mg). Dies entspricht 104 mg PFBA/m³ Aktivkohle.

Zwischenbilanz 2

Ab Durchbruch (ca. 15.05.2020) der Füllung C bis zu einer Konzentration von ca. 0,04 µg/l PFBA (0,035) im gefilterten Wasser bindet die Füllung C weitere 508 mg PFBA (143 + 56 + 63 + 150 + 96 mg). Dies entspricht 169 PFBA mg/m³ Aktivkohle.

Zwischenbilanz 3

Ab Zwischenbilanz 2 bis zu einer Konzentration von 0,073 PFBA µg/l nach Filter am 14.08.2020 bindet die Füllung weitere 125 mg PFBA (84 + 41 mg). Dies entspricht 42 mg PFBA/m³ Aktivkohle. Mit 0,073 µg/l PFBA liegt die Konzentration nach Filter knapp über der Rohwasserkonzentration (0,071 µg/l). Somit ist am 14.08.2020 der Zeitpunkt zum Austausch der Aktivkohle gekommen. Der Austausch fand mit Verzögerung am 09.09.2020 statt. Dies ließ die PFBA-Werte nach dem 1. Filter ab 14.08.2020 über den Rohwassergehalt hinaus ansteigen.

Zwischenbilanz 1 + 2 + 3 = Gesamtbindung

Vom Beginn der Beschickung der Aktivkohlefüllung B bis zu ihrer vollen Beladung mit PFBA summiert sich die gebundene PFBA-Menge auf 944 mg (311 + 508 + 125 mg). Dies entspricht 315 mg PFBA/m³ Aktivkohle.

3.4.1.4 Aktivkohlefüllung D

Zwischenbilanz 1

Vom Beginn der Filterbeschickung bis zum Durchbruch:

Laut Tab. 7-7, S. 40 lag die PFBA-Konzentration nach Filter am 14.08.2020 bei 0,002 µg/l. Dieses Probenahmedatum entspricht somit ziemlich genau dem Durchbruchsdatum (Bestimmungsgrenze 0,001 µg/l). Bis zu diesem Zeitpunkt hat die Füllung D insgesamt 546 mg PFBA gebunden (26 + 82 +63 + 113 + 262 mg). Dies entspricht 182 mg PFBA/m³ Aktivkohle.

Zwischenbilanz 2

Ab Durchbruch (14.08.2020) der Füllung D bis zu einer Konzentration von ca. 0,04 µg/l PFBA (0,046 µg/l am 30.09.2020) nach Filter bindet die Füllung C weitere 617 mg PFBA (212 + 250 + 79 + 76 mg). Dies entspricht 206 PFBA mg/m³ Aktivkohle. Die genannten 0,046 µg/l PFBA im gefilterten Wasser kommen schon nahe an die Konzentration des Rohwassers heran (0,065 µg/l am 30.09.2020). Diese Rohwasserkonzentration ist geringer als bei den vorausgegangenen Messungen. Ein Füllungswechsel soll bei Erreichen der Konzentrationsgleiche „Filtereinlass (Rohwasserkonzentration) = Filterauslass“ erfolgen. Sinkt die Rohwasserkonzention, dann muss die Aktivkohle schon früher bei einer entsprechend geringeren Konzentration nach Filter ausgetauscht werden. Der Aktivkohle ist somit früher voll beladen. Bei höherem Rohwassergehalt hätte die Aktivkohle eine etwas längere Standzeit gehabt und etwas mehr PFBA binden können.

Zwischenbilanz 1 + 2 = Gesamtbindung

Vom Beginn der Beschickung der Aktivkohlefüllung D bis nahezu voller Beladung bei deutlich gesunkener Rohwasserkonzentration mit PFBA summiert sich die gebundene PFBA-Menge auf 1163 mg (546 + 617 mg). Dies entspricht 388 mg PFBA/m³ Aktivkohle. Die nahezu volle Beladung ist bei Füllung D wegen der gesunkenen PFBA-Konzentration im Rohwasser schon mit der Zwischenbilanz 2 bei einer Konzentration von 0,046 µg/l nach Filter erreicht.

3.5 Kontrolle der Verkeimung – Mikrobiologische Untersuchungen

Für die Projektjahre 2019 und 2020 liegen mikrobiologische Untersuchungen nach Trinkwasserverordnung (einschließlich Pseudosomonas aeruginosa und Enterkokken) vor, im Jahr 2020 zusätzlich eine Untersuchung auf Salmonellen. Die Probenahmestellen enthält Tab. 3-5 unten.

Tab. 3-5 Hygienisch-mikrobiologische Klassifizierung des Wassers verschiedener Probenahmestellen in den Jahren 2019 und 2020

	2019 Jahresende			2020 Jahresbeginn		
	Trinkwasser Ek 1	**Ek 2**	**Ek 3**	**Trinkwasser Ek 1**	**Ek 2**	**Ek 3**
Rohwasser	Nein	✓	✓	Nein	✓	✓
Nach 1. Filter	Nein	Nein	✓	Nein	✓	✓
Nach 2. Filter	Nein	✓	✓	Nein	✓	✓
Nach Speicher	Nicht untersucht			Nein	✓	✓

Die mikrobiologische Untersuchung im Jahr 2019 vor Winter ergab für das Rohwasser die Klassifizierung Ek 2 (Eignungsklasse), nach dem 1. Filter Ek 3 und nach dem 2. Filter Ek 2. Damit war das Bewässerungswasser nach Passage der Reinigungsanlage uneingeschränkt verwendbar auch für Ernteprodukte des Rohverzehrs. (Tab. 7-8, S. 41). Im Jahr 2020, zu Beginn der Bewässerungssaison, weisen die Prüfberichte diese uneingeschränkte Eignung nach dem 2. Filter ebenfalls aus; und auch nach dem Speicher, der das Bewässerungssystem speist.

3.6 Kostenkalkulation

Tab. 3-6 Kalkulation jährlicher Kosten bei einer gereinigten Wassermenge von 30.000 m³

					Kauf		€	€/m³
Anlage mit 2 Filtern je 3 m³					30.000	AfA 1	3.000	0,10
Betriebsmittel (Aktivkohle) 0,2 €/m³ Wasser							6.000	0,20
Reaktivierung (Aktivkohle) 0,1 €/m³ Wasser							3.000	0,10
Instandhaltung							3.000	0,10
Strom 2000 kWh a 0,75 €							1.500	0,05
				Züblin Zwischensum.1			16.500	0,55
Anlieferung, Montage, Inbetriebnahme					5.900	AfA 1	590	0,02
Speichersack 500 m³					17.000	AfA 1	1.700	0,06
Analytik 12 x 90 €							1.080	0,04
Genehmigungsplanung: Bauhöhe, Statik								
Standfläche Filter, Gutachten					2.500		250	0,01
					Zwischensum.2		3.620	0,12
Geeignetes Dieselaggregat					16.000	AfA 2	2.286	0,08
Weitere Installationen geschätzt					1.200		120	0,00
Beton-Bodenplatte Silos					800		80	0,00
Prep. Untergrund Speicher					500		50	0,00
Gereinigte Wassermenge		AfA 1	AfA 2		Zwischensum.3		2.536	0,08
30000	m³	10	7		Summe gesamt		22.656	0,76

Teil 1 (Züblin) der Kostenkalkulation in Tab. 3-6 oben ist Bestandteil des Protokolls zur Besprechung Pilotanlage am 07.11.2019. Zu diesem Zeitpunkt war schon klar, dass die Anlage – abweichend von der ursprünglichen Planung – statt mit 3 Filtern problemlos mit nur 2 Filtern betrieben werden kann. Deshalb sind die Kosten in Tab. 3-6 oben für eine Anlage mit 2 x 3 m³ Silos kalkuliert. Der Kostenkalkulation liegt eine gereinigte Wassermenge von 30.000 m³ pro Jahr zugrunde. Dies entspricht in etwa dem Jahresbedarf des Pilotbetriebs.

Der Hauptkostenfaktor einer Aktivkohle-Reinigungsanlage ist nach Tab. 3-6 oben die Aktivkohle und ihre Reaktivierung samt Austausch. Für Neukohle und Reaktivierung samt Austausch fallen nach Tab. 3-6 oben 0,3 €/m³ gereinigten Wassers an. Die Aktivkohlekosten liegen damit für 30.000 m³ bei 9.000 €/Jahr. Mit 0,3 €/m³ beträgt der Anteil der Aktivkohlekosten knapp 40 % der veranschlagten Gesamtkosten (0,76 €/m³). (Bei einer Schüttdichte von 500 kg/m³ wiegen 6 m³ Aktivkohle 3.000 kg. Der Kohlepreis beträgt somit inklusive Reaktivierung und Austausch 3 €/kg Aktivkohle.) Die Aktivkohlemenge von 6 m³ bemisst sich nach der PFC-Rohwasserkonzentration und der zu reinigenden Wassermenge. Im vorliegenden Fall liegt der Fokus auf PFBA, für welche die Aktivkohle die geringste Bin-

dekapazität besitzt. Langkettige PFC und DOC binden bevorzugt an die Aktivkohle und können PFBA desorbieren. Die Rohwasserkonzentration an PFBA beträgt 2019 im Mittel von 5 Messungen 0,113 µg/l (entsprechend 0,113 mg PFBA/m^3 Wasser). Der Kostenkalkulation Tab. 3-6, S. 24 liegt demnach eine Bindekapazität von 565 PFBA mg/m^3 Aktivkohle zugrunde. (0,113 mg/m^3 x 30.000 m^3 = 3390 mg; 3390 mg/6 m^3 Aktivkohle = 565 mg/m^3 Aktivkohle).

3.7 Erfahrungen des Betriebsleiters

<Die Anlage ist für den derzeitigen Bewässerungsumfang von 14 – 15 ha korrekt ausgelegt. Der Bewässerungsbedarf ließ sich zu jeder Zeit erfüllen. Mithilfe dieser Reinigungsanlage war es wieder möglich, mehr und qualitativ höherwertige Erzeugnisse zu vermarkten. Für Betriebsleiter, die bereits mit Bewässerung vertraut sind, ist die Anlage ohne zusätzliche spezielle Technikkenntnisse gut bedienbar. Bei der Kundschaft fand die Installation der Anlage ein positives Echo. Die automatisiert und fast wartungsfrei laufende Anlage erfordert nur wenig mehr Arbeitszeitaufwand. Die Bewässerung aus dem Speichervorrat stellt etwas höhere Anforderungen an die Organisation. Der Betrieb will die PFC-Filterung des Bewässerungswassers mit Aktivkohle fortführen. (Befragung des Betriebsleiters durch GOTTSCHLICH, A. (2019 und 2020).)>

4 DISKUSSION

4.1 Die Filterwirkung in den Jahren 2019 und 2020 (Diskussion)

Die Beschickung eines Filters mit Rohwasser ist nur solange sinnvoll, bis die Konzentration des zu filternden Stoffes die Konzentration des Rohwassers erreicht hat. Im vorliegenden Fall ist nur PFBA zu betrachten, für welche die Aktivkohle die geringste Bindefähigkeit aufweist. Alle anderen PFC-Verbindungen des Rohwassers binden so stark an die Aktivkohle, dass sie so gut wie nicht im gefilterten Wasser zu finden sind.

Strömt Rohwasser fortgesetzt in den Filter, auch wenn nach Filter die PFBA-Rohwasserkonzentration schon erreicht ist, dann können die stärker bindenden längerkettigen PFC-Verbindungen des Rohwassers schon gebundenes PFBA wieder von seinen Bindungsplätzen verdrängen. (So geschehen im Zeitraum vom 02.09.2019 bis 28.10.2019 bei Füllung A (siehe Tab. 7-7, S. 40; Zellen L9-10) und am 09.09.2020 bei Füllung C (Zelle L29). Deshalb ist es nicht nur nutzlos, eine Füllung über die Konzentrationsgleiche (Konzentration Einlass = Auslass) hinaus im System zu belassen, sondern nachteilig: Die aus der Aktivkohle des 1. Filters verdrängte PFBA-Menge beansprucht in Folge erneut Bindekapazität im nachgeschalteten Filter. Dies mindert die Gesamt-Filterleistung und verursacht damit vermeidbare höhere Kosten.

Die Gesamt-Bindekapazität einer Füllung setzt sich zusammen aus der Bindekapazität bis Durchbruch und der Bindekapazität nach Durchbruch bis zur Konzentrationsgleiche (Schadstoffkonzentration Filtereinlass = Filterauslass). Bei einer geringen PFC-Rohwasserkonzentration bindet die Füllung nach Durchbruch nur noch wenig PFC, bis am Filterauslass der Einlasswert des Rohwassers erreicht ist (Füllung unter diesen Bedingungen voll beladen). Bei höherer PFC-Konzentration im Rohwasser kann die Füllung nach Durchbruch bis zur Konzentrationsgleiche noch weiteres PFC binden bis am Auslass die höhere Einlasskonzentration erreicht ist. Die nutzbare PFBA-Bindekapazität ist somit keine absolute Größe, sondern abhängig von der PFBA-Konzentration im Rohwasser. Bei schwankenden Rohwasserkonzentrationen schwankt demnach auch die nutzbare Bindekapazität von Aktivkohle-Füllungen, selbst wenn diese exakt dieselbe Bindekapazität aufwiesen. Die Bindeleistung der verschiedenen Füllungen bis zum Zeitpunkt des Füllungstausches (Konzentationsgleiche) ist daher im vorliegenden Fall nicht geeignet für einen Vergleich der verschiedenen Füllungen. Deshalb dienen hier zum Vergleich verschiedener Füllungen die jeweiligen PFBA-Bindungsmengen bis zum Durchbruch einer Aktivkohle-Füllung – oder auch die Bindungsmengen bis zu einem Zeitpunkt, an dem die Auslasskonzentration bei allen Füllungen gleich ist.

Auch die Betrachtung hinsichtlich Filterposition ist wichtig: Dies gab im vorliegenden Fall Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Bindekapazität, wenn gewässerte Filter überwintern (Überwinterung Füllungen B und C nach Betrieb in 2. und 3. Filterposition 2019). Außerdem entspricht der Einsatz als 1. und 2. Filter zwei Zeitspannen unterschiedlicher Wasserzufuhr: In 2. Filterposition erhält eine Füllung gefiltertes Rohwasser mit allmählich ansteigender PFBA-Konzentration. In 1. Filterposition erhält eine Füllung sämtliche PFC-Verbindungen und alle sonstigen gelösten Stoffe des Rohwassers von Anfang an in voller Konzentration.

Für die Auslegung der Anlage und die Kostenberechnungen waren je Jahr 30.000 m^3 mit einer PFBA-Konzentration von 0,113 mg/m^3 veranschlagt. Die 6 m^3 Aktivkohle sollten demnach 3390 mg PFBA binden. Somit liegt der Berechnung eine Bindeleisung von 565 mg je m^3 Aktivkohle zugrunde. Die Anlage reinigte in zwei Jahren mit 12 m^3 Aktivkohle aus 57.000 m^3 Rohwasser 5228 mg PFBA heraus. Angenommen Füllung D hat noch eine ungenutzte Rest-Bindekapazitat von 200 mg PFBA, dann liegt die gesamte Bindekapazität der eingesetzten 12 m^3 Aktivkohle bei 5428 mg PFBA. Dies entspricht 452 mg PFBA/m^3 Aktivkohle.

Betrachtet man die Jahre 2019 und 2020 getrennt, so haben im Jahr 2019 4,5 m^3 Aktivkohle 2508 mg PFBA gebunden. Dies entspricht 557 mg/m^3 Aktivkohle. Im Jahr 2020 haben 7,5 m^3 Aktivkohle 2723 mg PFBA gebunden. Dies entspricht 363 mg/m^3 Aktivkohle.

Die geringere Bindeleistung im Jahr 2020 ist z. T. der gesunkenen Rohwasserkonzentration geschuldet (mittlere PFBA-Konzentration im Jahr 2019 0,113 µg/l; im Jahr 2020 0,073 µg/l). Jedoch ist nicht zu erwarten, dass – gleiche Bindekapazität der Kohlechargen vorausgesetzt – sinkende Rohwasserkonzentrationen zu einem höheren Kohlebedarf (häufigerem Füllungstausch) führen. Hierzu mag z. T. beigetragen haben, dass sich eine Überwinterung nachteilig auf die Bindekapazität der Füllungen B und C auswirkte (Biofilm?). Eine weitere Ursache könnten unterschiedliche Bindekapazitäten verschiedener Kohlechargen sein.

4.1.1 PFBA-Bindung der Aktivkohlefüllungen A, B, C, D als 1. und 2. Filter (Diskussion)

Füllung A ist im Jahr 2019 ab Inbetriebnahme der Anlage als allererste Füllung im 1. Filter eingesetzt. Sie steht nie in 2. Filterposition. Ihre Bindeleistung ist deutlich höher als diejenige der Füllungen B, C und D, obwohl Füllung A während ihrer gesamten Standzeit sämtliche weiteren kurzkettigen PFC samt PFOA herausreinigt. (An der gesamten im Rohwasser gemessenen PFC-Menge macht PFBA lediglich 9 % aus.) Dazu auch weitere nicht gemessene im Rohwasser gelöste Stoffe. Alle nachfolgenden Füllungen B, C und D erhielten

laut den Analysenergebnissen nur in 1. Filterposition alle im Rohwasser vorhandenen PFC und weitere gelöste Stoffe. In ihrer Position als 2. Filter war das zugeführte Wasser bis auf PFBA nahezu PFC-frei. Deshalb wäre zu erwarten, dass die Bindekapazität eines nachgeschalteten Filters für PFBA eher höher ausfällt als die PFBA-Bindekapazität des allerersten Filters.

4.1.2 PFBA-Bindung der Füllungen A, B, C, D bis zu verschiedenen Rohwasserkonzentrationen (Diskussion)

Für einen effektiven Betrieb einer Filteranlage ist die Bindekapazität der Aktivkohle maßgebend. Diese sollte möglichst hoch und möglichst gleichmäßig sein.

Für einen Vergleich verschiedener Aktivkohletypen und evtl. auch verschiedener Chargen ist die Bindeleistung bis zum Austausch dann nicht geeignet, wenn die Konzentrationen im zugeführten Rohwasser schwanken. In solchen Fällen erzwingt eine sinkende Rohwasserkonzentration des zu filternden Stoffes bezogen auf die Schadstofffracht einen früheren Austausch. Diejenige Bindekapazität, die bei höherer Rohwasserkonzentration noch zum Tragen gekommen wäre, bleibt ungenutzt.

Im Allgemeinen dient als Vergleichsgröße für die Stoffbindung von Filterkörpern das „Bettvolumen“ (BV). Dieses entspricht dem Leervolumen eines Filters – im vorliegenden Fall 3 m^3.

Der 1. und 2. Filter haben im Jahr 2019 ca. dieselben Bettvolumina von ca. 3300 bzw. 3600 bis es zum Durchbruch kommt. Für den 1. Filter ergibt sich jedoch aufgrund der ca. zweifach höheren PFBA-Konzentration im Zustrom eine ca. zweifach höhere gebundene PFBA-Menge bis zum Durchbruch. Entsprechend ist die Vergleichsgröße „Bettvolumina“ hier nicht geeignet. Deshalb dient im vorliegenden Fall die PFBA-Menge, die ein Kubikmeter Aktivkohle bis zum Durchbruch gebunden hat, zum Vergleich der Füllungen.

Beim Vergleich der Füllungen A, B, C und D fällt besonders die hohe Bindeleistung von Füllung A und die sehr geringe Bindeleisung von Füllung C bis zum Durchbruch auf (Abb. 3-6, S. 19). Diese beträgt bei Füllung C weniger als ein Drittel der Füllung A. Laut Fa. Züblin ist es denkbar, dass sich aufgrund von DOC im Wasser über das Winterhalbjahr ein Biofilm gebildet hat, der die PFBA-Bindung in der folgenden Bewässerungssaison beeinträchtigte. Wasser, das die Füllung C vor Winter durchströmte, müsste die geringste DOC-Konzentration gehabt haben, denn es waren die Füllungen A und B vorgeschaltet. Die Fa. Züblin empfiehlt, Füllungswechsel erst im Frühjahr vor der neuen Bewässerungssaison durchzuführen. Außerdem ist geraten, das Brunnenwasser vor Inbetriebnahme auf DOC und Eisen zu untersuchen.

Füllung B und D zeigen in den Abschnitten „bis Durchbruch“ und „Durchbruch bis 0,04 µg/l PFBA nach Filter“ annähernd dieselbe Bindeleistung. Im Abschnitt „Durchbruch bis 0,04 µg/l PFBA nach Filter“ binden alle Füllungen ca. dieselbe PFBA-Menge.

Der Vergleich des Abschnitts „0,04 µg/l PFBA bis Vollbeladung“ zeigt die zusätzliche Bindeleistung, die mit steigender Rohwasserkonzentration zusammenhängt. Dieser Anteil ist entsprechend bei Füllung A im Jahr 2019 mit der höchsten Rohwasserkonzentration am größten. Der Anteil beträgt bei Füllung A 17 % der Bindeleistung bis 0,04 µg/l PFBA nach Filter (17 % von 369 + 159 mg PFBA/m^3 Aktivkohle). Bei allen anderen Füllungen ist der Anteil kleiner. Damit lässt sich die maximale Restbindekapazität in Abhängigkeit von der Rohwasserkonzentration abschätzen, wenn nach dem 1. Filter eine Konzentration von 0,04 µg/l PFBA zu messen ist. Für Füllung D ergibt sich daraus eine maximale zusätzliche Bindekapazität von ca. 65 mg PFBA/m^3 (17 % von Summe 182 mg + 206 mg PFBA). Dies entspricht ca. 200 mg bei 3 m^3 Füllung und harmoniert mit Abb. 3-4, S. 15 Teilabb. Füllung D.

Zum effektiven Einsatz einer Filteranlage wäre es wünschenswert und notwendig, für die verwendete Aktivkohle Angaben zur Schadstoff-Bindekapazität (hier PFBA) unter standardisierten Bedingungen zu haben. Solche Angaben sind nicht direkt auf verschiedene Standorte mit unterschiedlicher PFC-Signatur und unterschiedlichen DOC-Gehalten im Rohwasser übertragbar. Für einen Vergleich von Kohlequalitäten ließen sie sich jedoch heranziehen.

Eine andere Möglichkeit, die Kohlequalitäten in Erfahrung zu bringen, bietet die Erstellung von Adsorptionsisothermen mit dem zu reinigenden Wasser. <Die Adsorptionsisothermen geben Aufschluss über die benötigte Aktivkohlemenge für ein definiertes Reinigungsziel. (DVGW (2011)).> Dies ist standortspezifisch möglich.

Nur bei besserer Kenntnis der Aktivkohlequalität lassen sich die erforderlichen Aktivkohlemengen und Austauschzeitpunkte rationell planen. Je genauer die Qualität der Aktivkohle bekannt ist, desto weniger Wasseruntersuchungen sind erforderlich, um die Austauschzeitpunkte zu bestimmen. Auch lässt sich dann der Aktivkohleeinsatz vor Winter minimieren, um möglichst keine gewässerte Kohle über Winter lagern zu müssen.

4.1.3 Weitere Aspekte zur Aktivkohlefilterung (Diskussion)

In den beiden Projektjahren banden überschlägig 12 m^3 Aktivkohle aus 57.000 m^3 Rohwasser 5200 mg PFBA, sodass die Quotientensumme im Ablauf immer Null betrug. Damit einher ging die Bindung von insgesamt ca. 58.000 mg PFC, denn der PFBA-Anteil am Gesamt-PFC-Gehalt des Rohwassers betrug lediglich ca. 9 %.

<Die Aktivkohle bindet nur organische Stoffe. Wirksam sind dabei die sog. Van-der-Waals-Kräfte. Eine Veränderung der Mineral- und Spurennährstoffzusammensetzung ist daher nicht zu befürchten. (Züblin, Edel H.-G. mündliche Mitteilung 16.02.2021)> Die Nährstoffdosierung bei Bewässerung von Pflanzen auf nährstoffarmem Substrat kann somit wie gewohnt erfolgen.

Denkbar ist, dass sich auch Pflanzenkohle für die PFC-Filterung eignet. Entsprechende Prüfungen verschiedener Ausgangsmaterialien auf Bindekapazität und Bindespezifität sind vom Prinzip her nicht kompliziert. Falls sich geeignetes Pflanzenmaterial findet, könnte bei höherem Kohlebedarf für Bewässerungs- und Trinkwasser eine Herstellung vor Ort interessant sein. Schon eingetretene und künftig zu erwartende erhebliche Preissteigerungen bei der Aktivkohle und zunehmende Lieferkettenprobleme lassen verstärkt in diese Richtung denken.

4.2 Kontrolle der Verkeimung – Mikrobiologische Untersuchungen (Diskussion)

<Wäre eine Benetzung der zum Verzehr geeigneten Ernteprodukte auszuschließen, dann entfielen grundsätzlich die Einschränkungen der Bewässerung gemäß hygienisch-mikrobiologischen Eignungsklassen (Tab. 7-8, S. 41 Fußnote 2; PFLEGER (2010)).> Der gärtnerische Betrieb des Pilotprojekts bewässert jedoch einen Teil seiner Fläche über Kopf (Tab. 2-1, S. 9).

Die mikrobiologischen Untersuchungen in den Jahren 2019 und 2020 an verschiedenen Stellen der Reinigungsanlage zeigen keine Probleme mit der Verkeimung im Bewässerungswasser nach Passage des 2. (letzten) Filters. In einem Fall lag die Zahl der Enterokokken nach dem 1. Filter über 100/100 ml. <Enterkokken lassen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf fäkale Verunreinigungen schließen. Falls ein solches Ergebnis wiederholt vorkommt, ist eine Suche nach der Ursache angezeigt (ALBRECHT & PFLEGER (2004)). ALBRECHT & PFLEGER (2004) empfehlen bakteriologische Untersuchungen von Brunnen im Abstand von 3 Jahren ohne bestimmten Termin innerhalb des Untersuchungsjahres. Für Speicher ist eine bakteriologische Untersuchung jährlich im Juli empfohlen. Diese Untersuchungen liefern auch Nachweise im Sinne des Produkthaftungsgesetzes und des Verbraucherschutzes. Die Untersuchung auf Salmonellen wird erst bei Verdacht auf Abwassereinleitungen oder bei einer 5-fachen Besatzdichte der Indikatoren der Ek 3 für erforderlich gehalten (PFLEGER (2010)). Da Trinkwasserqualität nicht gefordert ist, kann sich eine mikrobiologische Routine-Untersuchung am Standort der Pilotanlage auf Enterokokken (=Fäkalstreptokokken bei ALBRECHT & PFLEGER (2004)) und auf Escherichia coli beschränken.>

4.3 Kosten (Diskussion)

Die durchschnittliche Konzentration an PFBA im Rohwasser beträgt im Jahr 2019 0,113 µg/l. Daraus ergibt sich eine Fracht von insgesamt 3390 mg PFBA bei einer Wassermenge vom 30.000 m^3. Sollen 6 m^3 Aktivkohle diese Fracht vollständig binden, so muss ihre Bindekapazität 565 mg PFBA/m^3 betragen. Falls die Bindekapazität nur 400 mg/m^3 beträgt, sind 8,4 m^3 erforderlich. Für diesen Fall steigen die Kosten für neue Aktivkohle um 40 % von 0,2 auf 0,28 €/m^3 gereinigten Wassers und von 0,1 auf 0,14 €/m^3 für die Reaktivierung. Insgesamt würden sich die Kosten je m^3 gereinigten Wassers dadurch von 0,75 €/m^3 auf 0,87 €/m^3 erhöhen (0,12 €/m^3). Die Mehrkosten für 30.000 m^3 beliefen sich damit auf 3.600 €/Jahr. Die Bindekapazitäten der Füllungen B, C, D sind erheblich geringer als die Bindekapazität der Füllung A. (Bis zum Durchbruch 369 mg PFBA/m^3 Aktivkohle bei Füllung A, 104 mg PFBA/m^3 bei Füllung C.) Die Überwinterung der gewässerten Aktivkohle kann eine Ursache sein – evtl. durch Bildung eines Biofilms. U. U. liegen unterschiedliche Kohlequalitäten vor oder es spielen beide Faktoren eine Rolle. Für eine Kostenbetrachtung nötig, aber hier nicht möglich, ist eine Quantifizierung der Faktoren, welche die unterschiedlichen Bindekapazitäten verursachen. Eine gleichmäßig hohe Bindekapazität der Aktivkohle (siehe auch 4.1.2, S. 28 Schluss) ist ein Hauptfaktor bei der Kostenbetrachtung.

Für Wartung – veranschlagt mit 0,1 €/m^3 – fallen in den ersten beiden Jahren so gut wie keine Kosten an. Entsprechend günstiger als vorab kalkuliert ist der Anlagenbetrieb.

Statt feststehender Filterbehälter sind auch fahrbare Lösungen mit Behältern möglich, die aufgrund ihrer geringen Höhe keine Baugenehmigung benötigen. Dies vereinfacht außerdem den Füllungstausch und erspart Arbeit sowie Kosten für Fundamentbau und Statikgutachten.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Das Pilotprojekt zur PFAS/PFC-Reinigung von Bewässerungswasser mittels Aktivkohlefilter begann im Frühjahr 2019 und endete am 31.12.2020.

Die Anlage ist für eine Bewässerung von ca. 15 ha Anbaufläche (Gemüse, Erdbeeren) ausgelegt. Im Jahr 2019 beträgt der Bedarf an gereinigtem Wasser ca. 22.000 m^3, im Jahr 2020 ca. 34.000 m^3.

Konzipiert ist die Anlage mit drei in Serie geschalteten Filtern. Jeder Filterbehälter beinhaltet 3 m^3 Aktivkohle, die speziell zur Bindung auch kurzkettiger PFC-Verbindungen geeignet ist. In beiden Projektjahren genügen dann zwei Filterbehälter, um das Bewässerungswasser ununterbrochen nahezu PFC-frei zu bekommen. Der Zeitpunkt, die Aktivkohle eines Filters zu wechseln, richtet sich nach den PFC-Konzentrationen im Rohwasser und in den Filterausläufen. Abweichend von einem der Projektziele ist bei einer Aktivkohlefüllung von 3 m^3 je Filter und der vorliegenden Bindekapazität der Kohle zwei- bis dreimal im Jahr ein Austausch von jeweils 3 m^3 Aktivkohle erforderlich. Der Austausch ist anders als zunächst befürchtet problemlos in den Betriebsablauf integrierbar. Die Bindekapazitäten der verschiedenen Aktivkohlefüllungen im Jahr 2019 und 2020 unterscheiden sich erheblich. Evtl. verursacht dies z. T. die Überwinterung der gewässerten Aktivkohle durch Bildung eines Biofilms. Diese Beeinträchtigung der Bindekapazität ließe sich über ein anderes Management beheben. Eine weitere Ursache ist der 2020 gesunkene Gehalt im Rohwasser an PFBA. Auch Kapazitätsunterschiede verschiedener Kohlechargen können eine Rolle spielen. Die Aktivkohle ist mit einem Anteil von 40 % an den spezifischen Kosten (€/m^3 gereinigten Wassers) ein Hauptkostenfaktor. Deshalb sind die PFBA-Bindekapazitäten von infrage kommenden Aktivkohletypen und -chargen intensiv zu prüfen, um hinsichtlich Höhe und Gleichmäßigkeit der Bindekapazität zu optimieren.

Als Wasserspeicher – eine Hauptkomponente im Bewässerungssystem – bewährt sich ein geschlossener 500-m^3-Speichersack aus Polyethylen. Ein ausreichendes Volumen des Wasserspeichers und die Möglichkeit diesen gleichmäßig in angemessener Zeit zu befüllen sind wesentliche Faktoren für die Funktionstüchtigkeit des Systems. Kostengründe grenzen die Leistung der Filtereinheit und den Umfang der Wasserspeicherung ein. Dies erhöht im Vergleich mit frei verfügbarem Bewässerungswasser die Anforderungen an das Verteilmanagement. Entsprechende Bewässerungstechnik mit Steuerung inklusive Meldung und Regulationsmöglichkeiten mittels Smartphone waren im Pilotbetrieb dazu dienlich.

Die Anlage erfüllte die gesteckten Ziele über Erwarten. Es gab keine Störungen des Filterbetriebs. Die Quotientensumme des gereinigten Bewässerungswassers betrug gemäß allen

Wasseruntersuchungen Null. Es ist möglich, die PFBA-Konzentration im Ablauf unter die Bestimmungsgrenze von 0,001 /l zu bringen.

Betriebe, die vom großflächigen PFC-Umweltschaden Mittelbadens betroffen sind, können in die PFAS/PFC-Reinigung ihres Bewässerungswassers ohne finanzielle und beratende Unterstützung nicht einsteigen. Selbst gut funktionierende Anlagen sind gegenüber dem natürlichen Zustand eines nicht verunreinigten Grundwassers eine zweitklassige Lösung – verbunden mit zusätzlichen personellen und finanziellen Aufwendungen. Für Sonderkulturbetriebe mit hoher Wertschöpfung ist eine solche Reinigungsanlage trotz allem interessant. Sie bietet u. U. die einzige Lösung, den Betrieb zu erhalten. An den meisten jetzt schon betroffenen Brunnenstandorten wird diese Zusatzbelastung durch PFC auf unabsehbare Zeit Bestand haben. Vielerorts wird der Reinigungsbedarf steigen: Die PFAS/PFC-Konzentrationen in den jetzt schon verunreinigten Brunnen werden teils zunehmen, teils wird die PFAS/PFC-Fahne des Grundwassers weitere Brunnen erreichen.

Die Informierung von Landwirten und Öffentlichkeit über das Pilotprojekt zur PFAS/PFC-Reinigung von Bewässerungswasser erfolgte über Ortsbesichtigungen, schriftliche Informationen des Landwirtschaftsamtes, Presse, Bürgerinformationsveranstaltung und LRA-Internetauftritt.

Nach erfolgreichem Pilotprojekt führt der Pilotbetrieb die PFAS/PFC-Reinigung seines Bewässerungswassers mittels Aktivkohle-Filteranlage auf unbestimmte Zeit fort.

6 LITERATUR

ALBRECHT, M. & PFLEGER, I. (2004); Empfehlungen für die Untersuchung und Bewertung von Wasser zur Bewässerung von gärtnerischen und landwirtschaftlichen Fruchtarten in Thüringen / Thüringer Anstalt für Landwirtschaft/ 3. Auflage 2003; 21 S.

DIN 19650 (1999); Bewässerung – Hygienische Belange von Bewässerungswasser. Normenausschuss für Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Beuth-Verlag GmbH, 4 S.

DVWK (2011); Technische Regeln – Arbeitsblatt DVGW W 239 (A); März 2011; 39 S.

GOTTSCHLICH, A. (2019 und 2020); Erfahrungsberichte PFC-Pilotanlage; Schreiben des LRA Karlsruhe Außenstelle Bruchsal Landwirtschaftsamt an LRA Rastatt Landwirtschaftsamt am 27.12.2019 und 08.02.2021.

PFLEGER, I. (2010); Bewässerungsqualität – Hygienische und chemische Belange / Thüringer Anstalt für Landwirtschaft / Themenblatt-Nr. 52.06; 10 S.

KASPRYK, O. & RODRIGUEZ, L. (2020); PFC: ein Problem für Generationen / UmweltMagazin / Jahrgang 50 (2020) Heft 01-02, 40-43

LUBW (2021); Grundwassermodell https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/pfc-karten-online; letzter Aufruf 14.02.2022.

RP Karlsruhe (2018); Vorgaben für die Beregnung in PFC-belasteten Gebieten für das Jahr 2019 - aus wasser- und bodenschutzrechtlicher Sicht - sowie aus landwirtschaftlicher und lebensmittelrechtlicher Sicht; 05.10.2018.

WALTER, H.; (1957); Wie kann man den Klimatypus anschaulich darstellen / *Die Umschau*, 24, 751-753.

7 ANHANG

Tab. 7-1 Temperatur (°C in 2 m Höhe) und Niederschlag (mm) 2019 und 2020 (Wetterstation Sinzheim)

Temp. 2 m	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	**Jahr**
2020	4,3	7,4	7,6	13,8	14,9	18,1	20,7	21,8	17,2	11,4	6,9	3,1	**12,3**
2019	1,6	5,8	8,8	10,8	12,6	20,8	21,2	20,7	15,9	12,8	6	4,5	**11,8**

Niederschl. mm	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	**Jahr**
2020	27	120	54	10	50	70	23	60	46	69	17	18	**564**
2019	55	22	72	49	122	50	39	64	61	65	40	67	**706**

Quelle: Agrarmeteorologie Baden-Württemberg (Datenbestand gepflegt vom LTZ Augustenberg Karlsruhe)

Tab. 7-2 PFBA-Zufuhr, -Bindung und -Durchlass der Aktivkohle-Füllungen A, B, C, D, E getrennt nach Filterposition (in mg, Füllung bestehend aus 3 m³ Aktivkohle)

PFBA in mg	1. Filter	2. Filter
Jahr 2019	Füllung A	Füllung B
Fracht aufgenommen	2502	660
Bindung	**1851**	**657**
Durchlass	*660*	*3*
1. Filtertausch		
Jahr 2020	Füllung B	Füllung C
Fracht aufgenommen	1183	570
Bindung	**614**	**509**
Durchlass	*570*	*61*
2. Filtertausch		
Jahr 2020	Füllung C	Füllung D
Fracht aufgenommen	1390	1060
Bindung	**433***	**1008**
Durchlass	*1060*	*52*
3. Filtertausch		
Jahr 2020	Füllung D	Füllung E
Fracht aufgenommen	275	116
Bindung	**159**	**116**
Durchlass	*116*	*0*
Summe	Gesamt	**Je m³ Aktivkohle**
Bindung 2019	2508	**557**
Bindung 2020**	2839	**363**
Bindung beide Jahre**	5231	**436**

* ohne Desorption, ** ohne Füllung E

Tab. 7-3 Wasserdurchsatz in m³ (kumuliert) und PFC-Konzentrationen im Jahr 2019: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter

							Probenahme		**02.05.2019**	**31.05.2019**	**28.06.2019**	**12.07.2019**	**02.08.2019**	**02.09.2019**	**01.10.2019**	**28.10.2019**	**02.09.2019**	**01.10.2019**	**28.10.2019**
							Durchsatz Wasser m3		1.097	5.603	10.004	13.062	15.737	20.772	22.032	22.369	20.772	22.032	22.369
m³ Wasser									1.100	5.600	10.000	13.100	15.700	20.800	22.000	22.400	20.800	22.000	22.400
										4.506	4.401	3.058	2.675	5.035	1.260	337		1.260	337
			Rohwasser						***Wasser gefiltert***										
Probe	Probe	Probe	UET-19-0061021-01	UET-19-0073593-01	UET-19-0086803-01	UET-19-0106027-01	UET-19-0151109-01		UET-19-0061021-02	UET-19-0073593-02	UET-19-0086803-02	UET-19-0095007-01	UET-19-0106027-02	UET-19-0120491-01	UET-19-0136616-01	UET-19-0151109-03	UET-19-0120491-02	UET-19-0136616-02	UET-19-0151109-05
Probe	Probe	Bezeichnung	**Rohwasser** - 02.05.2019	**Rohwasser** - 31.05.2019	**Rohwasser** - 28.06.2019	**Rohwasser** - 02.08.2019	**Rohwasser** 28.10.2019	**Rohwasser Mittel**	Nach 1. Filter - 02.05.2019	**Nach 1. Filter** - **31.05.2019**	**Nach 1. Filter** - **28.06.2019**	**Nach 1. Filter** - **12.07.2019**	**Nach 1. Filter** - **02.08.2019**	**Nach 1. Filter** - **02.09.2019**	**Nach 1. Filter** - **01.10.2019**	Nach 1. Filter 30 min 28.10.2019	**Nach 2. Filter** - **02.09.2019**	**Nach 2. Filter** - **01.10.2019**	2. Filter nach 30 nach Min 28.10.2019
		Eingangsdatum datum	03.05.2019	03.06.2019	28.06.2019	02.08.2019	28.10.2019		10.05.2019	03.06.2019	28.06.2019	12.07.2019	02.08.2019	02.09.2019	01.10.2019	28.10.2019	02.09.2019	01.10.2019	28.10.2019
BG µg/l 0,001	Probe	Probe	02.05.2019	31.05.2019	28.06.2019	02.08.2019	28.10.2019	.	02.05.2019	31.05.2019	28.06.2019	12.07.2019	02.08.2019	02.09.2019	02.10.2019	28.10.2019	02.09.2019	02.10.2019	28.10.2019
PFC-Verbindung	BG µg/l																		
PFBA	0,001	µg/l	0,117	0,119	0,083	0,122	0,122	0,113	0	0	0	0,02	0,039	0,099	0,143	0,16	0	0,003	0,005
PFPeA	0,001	µg/l	0,39	0,406	0,324	0,402	0,334	0,371	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFHxA	0,001	µg/l	0,384	0,31	0,379	0,387	0,386	0,369	0	0,001	0	0	0,003	0	0	0	0	0	0
PFHpA	0,001	µg/l	0,112	0,094	0,092	0,098	0,105	0,100	0	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0
PFOA	0,001	µg/l	0,291	0,23	0,282	0,27	0,279	0,270	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
PFBS	0,001	µg/l	0	0	0	0	0,002		0	0	0	0	0	0	0		0	0	
HPFHpA	0,001	µg/l	0	0	0	0	0,002		0	0	0	0,009	0	0	0	0,023	0	0	0,023
∑ Perfluortenside (PFT)		µg/l	1,29	1,16	1,16	1,28	1,23		--	0,001	0,005	0,029	0,041	0,099	0,143		--	0,004	
∑ kurzkettige PFC		µg/l	1,00	0,929	0,878	1,01	0,949		--	0,001	0,003	0,020	0,042	0,099	0,143		--	0,003	
∑ langkettige PFC		µg/l	0,291	0,230	0,282	0,270	0,279		--	--	0,001	--	--	--	--		--	--	
∑ PFC Carbonsäuren		µg/l	1,29	1,16	1,16	1,28	1,23		--	0,001	0,005	0,029	0,041	0,099	0,143		--	0,004	
∑ PFC-Sulfonsäuren		µg/l	--	--		--	0,002		--	--	--	--	--	--	--		--	--	
∑ PFOS / PFOA		µg/l	0,291	0,230	0,282	0,270	0,279		--	--	0,001	--	--	--	--		--	--	
QS PFC			3,0	2,4	2,9	2,8	2,9		--	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01		--	0	

Ein senkrechter rote Strich nach einem Messergebnis weist auf einen Füllungstausch im 1. Filter nach dem Messdatum hin.

Ebenfalls untersucht, aber immer unterhalb Bestimmungsgrenze (BG µg/l 0,001):

Perfluornonansäure (PFNoA); Perfluordekansäure (PFDA); Perfluorundecansäure (PFUdA); Perfluordodecansäure (PFDoDA); Perfluorpentansulfonsäure (PFPeS); Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS); Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS); Perfluoroctansulfonsäure (PFOS); Perfluordecansulfonsäure (PFDS); Perfluoroctansulfonamid (PFOSA); 2H,2H-Perfluordecanoat (H2PFDA); 2H,2H,3H,3H-Perfluorundecanoat (H4PFUnA); 1H,1H,2H,2H-Perfluorhexansulfonsäure (4:2 FTS); 1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (6:2 FTS) (H4PFOS); 1H,1H,2H,2H-Perfluordecansulfonsäure (8:2 FTS)

Tab. 7-4 Wasserdurchsatz in m³ und PFC-Konzentrationen im Jahr 2020: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter/ 1. Tabellenabschnitt

										interpoliert		*berechnet*	ab 02.06.2020
							28.10.2019	17.03.2020	16.04.2020	15.05.2020	27.05.2020	*02.06.2021*	**10.06.2020**
							22.369	22.369	25273	30.489	32.746	***33.646***	Zählerstände si
m³ Wasser					m3 von Datum zu Datum		0	0	2.904	5.216	2.257	*900*	1.200
					m3 Summe ab Filtertausch		0	0	2.904	8.120	10.377	*11.277*	1.200
	Rohwasser												***Wasser gefiltert***
	UET-20-0051842-0-1	UET-20-0077362-01	UET-20-0091507-03	UET-20-0106542-03	UET-20-0129358-03	UET-20-0145171-03		UET-20-0035865-01	UET-20-0045643/01-1	UET-20-0060152-01	UET-20-0065159-01		UET-20-0077362-02
	Rohwasser - 02.05.2019	Rohwasser	Rohwasser	Rohwasser	Rohwasser	Rohwasser	**Rohwasser Mittel**	Nach 1. Filter - 17.03.2020	Nach 1. Filter - 16.04.2020	Nach 1. Filter - 15.05.2020	Nach 1. Filter - 27.05.2020		nach 1. Filter 10.06.2020
	30.04.2020	22.06.2020	16.07.2020	14.08.2020	30.09.2020	30.10.2020		17.03.2020	24.04.2020	25.05.2020	29.05.2020		22.06.2020
	29.04.2020	10.06.2020	16.07.2020	14.08.2020	30.09.2020	30.10.2020	.	17.03.2020	16.04.2020	15.05.2020	27.05.2020	*02.06.2020*	10.06.2020
PFBA	0,112	0,071	0,08	0,071	0,064	0,038	0,073	0,006	0,031	0,072	0,082	*0,082*	0,025
PFPeA	0,388	0,215	0,282	0,231	0,196	0,133	0,241	0	0	0	0	0	0
PFHxA	0,383	0,295	0,27	0,257	0,206	0,136	0,258	0	0	0	0	0	0
PFHpA	0,094	0,075	0,073	0,069	0,062	0,049	0,070	0	0	0	0	0	0
PFOA	0,304	0,231	0,263	0,234	0,124	0,118	0,212	0	0	0	0	0	0,002
PFNoA	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0
PFDA	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0,003	0	0
PFBS	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0		0	0	0	0	0	0
PFPeS	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
PFHxS	0,002	0,002	0,001	0,002	0	0,001		0	0	0	0	0	0
PFHpS	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
PFOS	0	0	0,001	0,002	0,002	0,002		0	0	0	0	0	0
PFDS	0	0	0	0	0,003	0		0	0	0	0	0	0
PFOSA	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
HPFHpA	0	0,002	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
∑ Perfluortenside (PFT)	1,29	0,892	0,972	0,868	0,658	0,477		0,006	0,031	0,072	0,085		0,027
∑ kurzkettige PFC	0,978	0,656	0,706	0,63	0,529	0,356		0,006	0,031	0	0		0,025
∑ langkettige PFC	0,306	0,233	0,265	0,238	0,129	0,121		0	0	0	0		0,002
∑ PFC Carbonsäuren	1,28	0,89	0,968	0,862	0,652	0,474		0,006	0,031	0	0		0,027
∑ PFC-Sulfonsäuren	0,003	0,002	0,004	0,006	0,006	0,003		0	0	0	0		0
∑ PFOS / PFOA	0,304	0,231	0,264	0,235	0,126	0,12		0	0	0	0		0,002
QS PFC	3,1	2,4	2,7	2,4	1,3	1,2		0	0,00	0	0		0,02

Ein senkrechter rote Strich nach einem Messergebnis weist auf einen Füllungstausch im 1. Filter nach dem Messdatum hin.

Tab. 7-5 Wasserdurchsatz in m³ und PFC-Konzentrationen im Jahr 2020: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter/ 2. Tabellenabschnitt

	ab 02.06.2020						*berechnet*	13835	Zählerstand berechnet bis 09.09.2020 (Filtertausch) siehe Tab.				
	10.06.2020	**01.07.2020**	**16.07.2020**	**30.07.2020**	**14.08.2020**	**27.08.2020**	***09.09.2020***	**16.09.2020**	**30.09.2020**	**30.10.2020**			
	Zählerstände siehe Tab.							15.486	17.891	18.018			
m³ Wasser	1.200	3.150	2.028	2.508	4.158	2.825	*3.066*	15.486	17.891	18.018			
	1.200	4.350	6.378	8.886	13.044	15.869	*18.935*	1.651	4.056	4.183			
								ab Filtertausch					
	Wasser gefiltert												
	UET-20-0077362-02	UET-20-83642-01	UET-20-0091507-01	UET-20-0098871-01	UET-20-0106542-01	UET-20-0112842-01		UET-20-0122330/01-1	UET-20-0129358-01	UET-20-0145171-01	UET-20-0035865-02	UET-20-0060152-02	UET-20-0065159-02
	nach 1. Filter 10.06.2020	nach 1. Filter 01.07.2020	Nach 1. Filter 16.07.2020	Nach 1. Filter 30.07.2021	Nach 1. Filter 14.08.2020	Nach 1. Filter 27.08.2020		Nach 1. Filter 16.09.2020	Nach 1. Filter 30.09.2020	Nach dem 1. Filter 30.10.2020	Nach 2. Filter - 17.03.2020	Nach 2. Filter 15.05.2020	Nach 2. Filter 27.05.2020
	22.06.2020	01.07.2020	16.07.2020	30.07.2020	14.08.2020	27.08.2020		16.09.2020	30.09.2020	30.10.2020	17.03.2020	25.05.2020	29.05.2020
	10.06.2020	01.07.2020	16.07.2020	30.07.2020	14.08.2020	27.08.2020	*09.09.2020*	16.09.2020	30.09.2020	30.10.2020	17.03.2020	15.05.2020	27.05.2020
PFBA	0,025	0,027	0,035	0,055	0,073	0,086	*0,104*	0,021	0,046	0,027	0	0,008	0,019
PFPeA	0	0,006	0	0	0	0,007	0	0	0	0	0	0	0
PFHxA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
PFHpA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFOA	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0
PFNoA	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
PFDA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFBS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFPeS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFHxS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFHpS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFDS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PFOSA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HPFHpA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
∑ Perfluortenside (PFT)	0,027	0,033	0,035	0,055	0,073	0,092		0,021	0,046	0,028		0	0,021
∑ kurzkettige PFC	0,025	0,033	0,035	0,055	0,073	0,093		0,021	0,046	0,027		0	0,021
∑ langkettige PFC	0,002	0	0	0	0	0		0	0	0,002		0	--
∑ PFC Carbonsäuren	0,027	0,033	0,035	0,055	0,073	0,092		0,021	0	0,028		0	0,021
∑ PFC-Sulfonsäuren	0	0	0	0	0	0		0	0,046	--		0	--
∑ PFOS / PFOA	0,002	0	0	0	0	0		0	0	0,002		0	--
QS PFC	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01		0,00	0,00	0,02		0,00	0,00

Ein senkrechter rote Strich nach einem Messergebnis weist auf einen Füllungstausch im 1. Filter nach dem Messdatum hin.

Tab. 7-6 Wasserdurchsatz in m³ und PFC-Konzentrationen im Jahr 2020: Rohwasser + Nach 1. Filter + Nach 2. Filter/ 3. Tabellenabschnitt

		berechnet							*berechnet*			
	UET-20-0065159-02		UET-20-0077362-03	UET-20-83642-01	UET-20-0091507-02	UET-20-0098871-02	UET-20-0106542-02	UET-20-0112842-02		UET-20-0098871-02	UET-20-0098871-02	UET-20-0145171-02
	Nach 2. Filter 27.05.2020		Nach 2. Filter 10.06.2020	Nach 2.Filter 01.07.2020	Nach 2.Filter 16.07.2020	Nach 2.Filter 30.07.2020	Nach 2.Filter 14.08.2020	Nach 2.Filter 27.08.2020		Nach 2.Filter 16.09..2020	Nach 2.Filter 30.09.2020	Nach 2.Filter 30.10.2020
	29.05.2020		22.06.2020	01.07.2020	16.07.2020	30.07.2020	14.08.2020	27.08.2020	09.09.2020	30.07.2020	30.09.2020	30.10.2020
	27.05.2020	*02.06.2020*	10.06.2020	01.07.2020	16.07.2020	30.07.2020	14.08.2020	27.08.2020		30.07.2020	30.09.2020	30.10.2020
PFBA	0,019	*0,02*	0	0	0	0	0,002	0,007	*0,012*	0	0	0
PFPeA	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFHxA	0,002		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFHpA	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFOA	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0,002
PFNoA	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFDA	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFBS	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFPeS	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFHxS	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFHpS	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFOS	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFDS	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
PFOSA	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0
HPFHpA	0		0,008	0	0	0	0	0		0	0	0
∑ Perfluortenside (PFT)	0,021		0,008	0	0	0	0,002	0,007		0	0	0,002
∑ kurzkettige PFC	0,021		0	0	0	0	0,002	0,007		0	0	0
∑ langkettige PFC	--		0	0	0	0	0	0		0	0	0,002
∑ PFC Carbonsäuren	0,021		0,008	0	0	0	0,002	0,007		0	0	0
∑ PFC-Sulfonsäuren	--		0	0	0	0	0	0		0	0	0
∑ PFOS / PFOA	--		0	0	0	0	0	0		0	0	0
QS PFC	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
Summe Perfluortenside (PFT) berechnet	0,021		0,008	0	0	0	0,002	0,007		0	0	0,002

Ein senkrechter rote Strich nach einem Messergebnis weist auf einen Füllungstausch im 1. Filter nach dem Messdatum hin.

Tab. 7-7 Wasserdurchsatz m³, PFBA-Konzentrationen (µg/l), Frachten und Bindung (mg): Rohwasser/ 1. Filter/ 2. Filter (zu Bindung siehe auch Tab. 7-2, S. 35)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1		m³/d	Datum	Diff.Tag	Zähler-stände m3	m3 Differenz	m³	PFBA Rohwasser Analyse µg/l	Konz. Für Frachtberech nung	Fracht mg geliefert	1. Filter Durchgelassen Konz.	Konz. Für Frachtberechn ung	Durchgel assen mg	Bindung 1. Filter	2. Filter Durchgelassen Konz.	Konz. Für Frachtberechn ung	Durchgel assen mg	Bindung 2. Filter
2	02.05.2019		02.05.2019		0			0,117			0	0	0	0	0	0		
3	10.05.2019	137	10.05.2019	8	1.097	1.097			*0,1172*	129	0	0	0	129	0	0		0
4	31.05.2019	215	31.05.2019	21	5.603	4.506		0,119	*0,1182*	533	0	0	0	533	0	0		0
5	28.06.2019	157	28.06.2019	28	10.004	4.401		0,083	*0,101*	444	0	0	0	444	0	0		0
6	12.07.2019	218	12.07.2019	14	13.062	3.058			*0,093*	286	0,02	0,010	31	255	0	0		31
7	02.08.2019	127	02.08.2019	21	15.737	2.675		0,122	*0,1129*	302	0,039	0,030	79	223	0	0		79
8	02.09.2019	162	02.09.2019	31	20.772	5.035			*0,122*	614	0,099	0,069	347	267	0	0		347
9	02.10.2019	42	02.10.2019	30	22.032	1.260			*0,122*	154	0,143	0,121	152	1	0,003	0,0015	2	151
10	28.10.2019	13	28.10.2019	26	22.369	337		0,122	*0,122*	41	0,16	0,152	51	-10	0,005	0,004	1	50
12	**m³/d**	**125**	**2019**	179	**m³/d 2019**		**22.369**	mittlere Konz	*0,112*	2502	Fracht 2019	0,053	660	1851			3	657
13				d			**m³**							Fülll. A				Füll. B
14	17.03.2020	0	17.03.2020	141	22.369	0		0,122			0,006				0	0		0
15	16.04.2020	97	16.04.2020	30	25.273	2.904	2.904		*0,1192*	346	0,031	0,019	54	292	0	0		54
16	29.04.2020	170	29.04.2020	13	27.479	2.206	5.110	0,112	*0,1142*	252		0,040	88	164	0	0		88
17	15.05.2020	188	15.05.2020	16	*30.489*	*3.010*	8.120	0	*0,1036*	312	0,072	0,060	181	131	0,008	0,004	12	169
18	27.05.2020	188	27.05.2020	12	32.746	2.257	10.377	0	*0,089*	201	0,082	0,077	174	27	0,019	0,0135	30	143
19	02.06.2020	150	02.06.2020	6	0	*900*	11.277		*0,080*	72	*0,082*	*0,082*	74	-2		0,020	18	56
21	**m³/d**	**146**		77		*11.277*	**11.277**	mittlere Konz	*0,105*	1183		0,051	570	614			61	509
22				d			**m³**							Füll. B				Füll. C
23	10.06.2020	150	10.06.2020	8	*565*	*1.200*	*1.200*	0,071	*0,074*	89	0,025	0,022	26	63	0	0		26
24	01.07.2020	150	01.07.2020	21	*1.244*	*3.150*	4.350		*0,074*	232	0,027	0,026	82	150	0	0		82
25	16.07.2020	135	16.07.2020	15	1.278	2.028	6.378	0,08	*0,078*	159	0,035	0,031	63	96	0	0		63
26	30.07.2020	179	30.07.2020	14	3.786	2.508	8.886		*0,078*	196	0,055	0,045	113	84	0	0		113
27	14.08.2020	277	14.08.2020	15	7.944	4.158	13.044	0,071	*0,074*	307	0,073	0,064	266	41	0,002	0,001	4	262
28	27.08.2020	217	27.08.2020	13	10.769	2.825	15.869		*0,070*	198	0,086	0,080	225	-27	0,007	0,0045	13	212
29	09.09.2020	236	09.09.2020	13	*13.835*	*3.066*	*18.935*		*0,068*	209	0,100	0,093	285	-77		0,012	35	250
31	**m³/d**	**191**		99		18935	**18.935**	mittlere Konz	*0,073*	1390		0,056	1060	433			52	1008
32				d			**m³**							Füll. C				Füll. D
33	16.09.2020	236	16.09.2020	7	15.486	1.651	1.651		*0,067*	110	0,021	0,019	31	79	0	0	0	31
34	30.09.2020	172	30.09.2020	14	*17.891*	2.405	4.056	0,064	*0,065*	156	0,046	0,034	81	76	0	0	0	81
35	30.10.2020	4	30.10.2020	30	18.018	127	4.183		*0,064*	8	0,027	0,037	5	3	0	0	0	5
37		**82**		51		4.183		mittlere Konz	*0,066*	275	mittlere Konz	0,066	116	159			0	116
38	**m³/d**	**152**	**2020**	227	**m³ 2020**		**34.395**	**mittlere Konz**	***0,083***	2847	Fracht 2020	Bindg.2020	1206	Füll. D		Bindg.2020	1633	Füll. E
39				Filtertausch		*0,082*	kusiv: Wert berechnet oder angenommen											

Tab. 7-8 Hygienisch-mikrobiologische Klassifizierung und Anwendungsbedingungen von Bewässerungswasser (PFLEGER, I (2010) und DIN 19650 (1999))

Eignungs-klasse (EK)	Anwendungsbereiche für Fruchtarten	Einschränkungen / Hinweise	Nicht-anwendung	Biologische Kenngrößen		
				Fäkalstrep-tokokken je 100 ml	E. coli je 100 ml	Salmo-nellen [1] je 1000 ml
1	alle Gewächshaus- und Freiland-kulturen			nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
2 [2]	Freiland- und Gewächshauskulturen für den Rohverzehr			≤ 100 [4]	≤ 200 [4]	nicht nachweisbar
3 [2]	nicht zum Verzehr bestimmte Gewächshauskulturen		für Gewächs-hauskulturen und Rohver-zehr in den Karenzzeiten	100 bis 400	200 bis 2000	nicht nach-weisbar
	Freilandkulturen für den Rohverzehr (Gemüse und Obst)	Gemüse bis 2 Wochen vor Ernte Obst bis Fruchtansatz				
	Gemüse und Obst zur Konservie-rung und Lagerung					
	Heil- und Gewürzpflanzen					
	alle anderen Freilandkulturen					
4 [2),3)] nach DIN 19650 (1999)	Kartoffeln, Nichtnahrungspflanzen zur industriellen Verarbeitung und Saatgut	bis 2 Wochen vor der Ernte	Gewächshaus-kulturen, Obst, Gemüse - in den Karenz-zeiten	Abwasser, das mindestens eine biolo-gische Reinigungsstufe durchlaufen hat		
	Wein- und Obstkulturen	Frostschutzberegnung				
4 [2),3)] nach Empfehlung TLL (2004)	Heil- und Gewürzpflanzen	bis 2 Wochen vor der Ernte	Gewächshaus-kulturen, Obst, Gemüse - in den Karenz-zeiten	> 400 [5]	> 2000 [5]	nicht nachweisbar
	Kartoffeln, Nichtnahrungspflanzen zur industriellen Verarbeitung und Saatgut	bis 2 Wochen vor der Ernte				
	Wein- und Obstkulturen	Frostschutzberegnung				

1) Salmonellen und potenziell infektiöse Stadien von Mensch- und Haustierparasiten dürfen nicht im Bewässerungswasser in 1000 ml nachweisbar sein.
2) Wenn durch das Bewässerungsverfahren eine Benetzung der zum Verzehr geeigneten Teile der Ernteprodukte ausgeschlossen ist, entfällt eine Einschränkung nach hygienisch-mikrobiologischen Eignungsklassen.
3) Bei der Beregnung muss durch Schutzmaßnahmen sichergestellt werden, dass Personal und Öffentlichkeit keinen Schaden nehmen.
4) Richtwert, der analog der TrinkwV § 2 Abs. 3 [3] so weit unterschritten werden sollte, „wie dies nach dem Stand der Technik mit vertretbarem Aufwand unter Berücksichtigung der Umstände des Einzelfalles möglich ist".
5) Die 10-fache Menge sollte nicht überschritten werden.