



Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Warburg

Kurzbericht der Machbarkeitsstudie

gefördert durch:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Impressum

Auftraggeber: Kommunalunternehmen der Stadt Warburg

Auftragnehmer: **Grontmij GmbH**

Postfach 30 01 06
50771 Köln

Graeffstraße 5
50823 Köln

Bearbeitung: Dr.-Ing. Heinrich Herbst
Dipl.-Ing. Christian Maus, M.Sc.

Laboranalytik: **Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)**

Bliersheimer Straße 58 - 60
47229 Duisburg

Dr. rer. nat. Jochen Türk
Andrea Börgers, M.Sc.

Stand: September 2013

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III	
Abbildungsverzeichnis	IV	
Tabellenverzeichnis	IV	
1	Veranlassung	1
2	Screening des Kläranlagenablaufs auf Spurenstoffe	3
3	Abwasserbehandlung der Kläranlage Warburg	5
4	Varianten	6
5	Bewertung der Varianten und Verfahrensempfehlung	9
6	Literaturverzeichnis	14

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Luftbild der Kläranlage Warburg (Google Maps)	5
--	---

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Im Vorfeld der Untersuchungen abgestimmter Untersuchungsumfang des Screenings des Kläranlagenablaufs der Kläranlage Warburg	3
Tabelle 2.2: Positive Befunde beim Pestizid-Screening	3
Tabelle 2.3: Darstellung der ermittelten Mittelwerte einiger Leitparameter aus den Bereichen Arzneimittelwirkstoffe, Industriechemikalien und Basisparameter aus drei 24-Stunden Mischproben des Ablaufs der Kläranlage Warburg im Vergleich mit Werten weiterer kommunaler Kläranlagen.	4
Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Investitions-, Betriebs- Kapital- und Jahreskosten sowie spezifische Jahreskosten bezogen auf die behandelte Schmutzwassermenge der betrachteten Varianten	8
Tabelle 5.1: Bewertung der Varianten	11

1 Veranlassung

Viele Stoffe des täglichen Gebrauchs sind geeignet, bei Kontakt mit Wasser dessen Eigenschaften nachhaltig und auch nachteilig zu verändern. Spurenstoffe lassen sich ubiquitär in der aquatischen Umwelt nachweisen. Neben Stoffen wie beispielsweise Industriechemikalien und Flammschutzmitteln, sind in den vergangenen Jahren die pharmazeutischen Wirkstoffe in den Fokus der Wissenschaft sowie der Öffentlichkeit gerückt. Humanpharmaka werden entweder unverändert oder nach Umbau im menschlichen Organismus als Konjugate bzw. Metaboliten ausgeschieden und gelangen so ins kommunale Abwasser. Die Spurenschadstoffproblematik liegt darin begründet, dass persistente Arzneimittel, organische Spurenstoffe und Industriechemikalien nur in begrenztem Maße während der biologischen Behandlung im Abwasserreinigungsprozess nach dem Stand der Technik eliminiert werden können und deshalb im Ablauf der Kläranlagen nach dem Stand der Technik noch nachweisbar sind. Ein gezielter Rückhalt dieser Stoffe ist mit kommunalen Kläranlagen nicht möglich. Daher gelangen Humanpharmaka und ihre Metaboliten über den Kläranlagenablauf in Oberflächengewässer.

Veterinärpharmaka werden mit der Gülle auf die Felder ausgebracht und gelangen überwiegend durch Abschwemmungen in die Oberflächengewässer. Bislang wurden weit über 100 Arzneimittelwirkstoffe teilweise in relevanten Konzentrationen oberhalb ökotoxikologischer Wirkschwellen im aquatischen Kreislauf nachgewiesen.

Humanpharmaka werden insbesondere vor dem Hintergrund des demographischen Wandels, der steigenden individuellen Lebenserwartung und des damit verknüpften steigenden Arzneimittelkonsums, in Zukunft in noch größerer Anzahl und Menge über die kommunale Abwasserentsorgung in die Umwelt eingebracht werden. In den letzten Jahren konnte die Ökotoxizität einer Vielzahl von Mikroverunreinigungen in der Umwelt nachgewiesen werden. Aufgrund der Persistenz, des Bioakkumulationspotenzials und der Toxizität von Spurenstoffen sind zur langfristigen Sicherung einer hohen Wasserqualität breit gefächerte Maßnahmen unerlässlich, den Eintrag von Spurenstoffen in die Kanalisation bzw. in die Gewässer zu minimieren.

Im Infrastruktursystem der Wasserver- und Abwasserentsorgung kann die Entfernung der Mikroschadstoffe an unterschiedlichen Stellen und mittels verschiedenster Verfahren realisiert werden. Hierbei kann zwischen der dezentralen Mikroschadstoffelimination am Anfallort (z.B. Industriebetriebe, Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen) und zentralen in der kommunalen Kläranlage oder bei der zentralen Trinkwasseraufbereitung unterschieden werden.

NRW setzt bei dem Thema der Spurenstoffelimination auf einen ganzheitlichen Ansatz auf unterschiedlichen Ebenen. So sollen Spurenstoffe, wenn möglich, direkt an der Quelle eliminiert werden. Aber auch Kläranlagen werden ausgebaut und die Trinkwasseraufbereitungstechnik modernisiert. Das Umweltministerium des Landes NRW fördert derzeit dazu durch das Investitionsprogramm Abwasser NRW u.a. großtechnische Anlagen zur Spurenstoffelimination.

Aktuell wird die Erweiterung von Kläranlagen um eine weitere Reinigungsstufe sowie die Ertüchtigung von Wasserwerken zur Mikroschadstoffentfernung verstärkt diskutiert (siehe z.B. Vorhaben „Reine Ruhr“ bzw. [4] und [2]). Für die Entfernung der Mikroschadstoffe stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, deren Effizienz in zahlreichen nationalen wie internationalen Forschungsvorhaben untersucht wurde bzw. wird. Mögliche Verfahren basieren auf folgenden Ansätzen:

- die Nanofiltration,
- die Umkehrosmose,
- die Ozonierung einschließlich AOPs (Advanced Oxidation Processes) und
- die Aktivkohleadsorption.

Eine weitgehende Verbesserung der Ablaufqualität bzw. Elimination der Mikroschadstoffe in Abläufen von kommunalen Kläranlagen ist durch weitergehende (additive) Maßnahmen realisierbar. Hierzu haben sich bisher die Techniken der Ozonung und der Aktivkohleadsorption zurzeit als umsetzbare Techniken herauskristallisiert.

Das Abwasser der Kläranlage Warburg setzt sich in wesentlichen Teilen aus dem kommunalen Anteil, den Abwässern der Südzucker AG (SZ), einer Brauerei und einem Krankenhaus zusammen. Die Kläranlage wurde ursprünglich für 70.000 EW bemessen. Durch Schließung eines Unternehmens sind ca. 30.000 EW weggefallen, sodass aktuell ca. 30.000 – 40.000 EW angeschlossen sind. Zudem sollen zukünftig die Abwässer der Zuckerfabrik (Erdtransportwasser) anaerob statt aerob behandelt werden. Daher liegt die Schlussfolgerung nahe, dass nicht alle Anlagenkapazitäten voll genutzt und somit einer anderen Nutzung zugeführt werden könnten, um z.B. Spurenstoffelimination auf der Kläranlage Warburg zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Studie wird unter Berücksichtigung der örtlichen Rahmenbedingungen geprüft, welche Anlagenkonfigurationen im Hinblick auf die Spurenstoffelimination und die Wirtschaftlichkeit für die großtechnische Umsetzung eingesetzt werden kann.

Im Zuge der Machbarkeitsstudie werden die Ergebnisse des Screenings des Abwassers der Kläranlage Warburg vorgestellt. Das Screening wurde vom Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) durchgeführt.

2 Screening des Kläranlagenablaufs auf Spurenstoffe

Zur Ermittlung von potentiellen Leitparametern wurde in Phase 1 der Machbarkeitsstudie ein dreitägiges Screening des Kläranlagenablaufs der Kläranlage Warburg durchgeführt. Das Screening erfolgt durch das Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) in Duisburg. Eine Vorauswahl der zu untersuchenden Gruppen von Spurenstoffen wurde anhand bekannter Haupteinleiter und Ergebnissen aus weiteren Untersuchungen zur Konzentration von Spurenstoffen im Ablauf kommunaler Kläranlagen vorgenommen. Nachfolgend sind aus dem umfangreichen Untersuchungsprogramm die in Absprache mit der Bezirksregierung Detmold ausgewählten Hauptkomponenten aufgeführt.

Tabelle 2.1: Im Vorfeld der Untersuchungen abgestimmter Untersuchungsumfang des Screenings des Kläranlagenablaufs der Kläranlage Warburg

Arzneimittel:	Atenolol, Bezafibrat, Bisoprolol, Carbamazepin, Clarithromycin, Diclofenac, Metoprolol, Naproxen, Oxazepam, Phenazon, Sotalol und Sulfamethoxazol
Röntgenkontrastmittel:	Amidotrizoesäure, Iomeprol, Iopromid und Iopamidol
Hormone:	17-alpha-Ethinylestradiol, 17-betaEstradiol und Estron
Phenole:	Bisphenol A und Nonylphenol
Sonstige Parameter:	Benzotriazol, DEHP, Diuron, Isoproturon und Terbytryn
Süßstoffe und Zucker:	Acesulfam, Sucralose und Saccharose

Im Screening wurden insgesamt 104 Substanzen und Summenparameter betrachtet und ausgewertet. Des Weiteren erfolgte ein Pestizid-Screening auf 73 Substanzen. Auch die Vorläufersubstanz Bromid des bei der Ozonung entstehenden potentiellen kanzerogenen Bromats wurde analysiert, um das Bromatbildungspotential des Kläranlagenablaufs abschätzen zu können. Die unterschiedlichen Probenahmetage waren der 11.12.2012, 12.12.2012 und der 13.12.2012.

In Tabelle 2.3 sind die Ergebnisse ausgewählter Parameter im Vergleich zu drei weiteren kommunalen Kläranlagen dargestellt. Die Kläranlagen wurden bereits im Rahmen des Investitionsprogramms Abwasser NRW mit Ozonanlagen zur Untersuchung der besseren Eliminierung der Spurenstoffe ausgerüstet [3]. Bei den Kläranlagen handelt es sich um die Kläranlagen Schwerte (Ruhrverband), Bad Sassendorf (Lippeverband) sowie die Kläranlage Duisburg-Vierlinden (Wirtschaftsbetriebe Duisburg AöR). Eine genaue Auflistung der Analysenwerte befindet sich im Anhang.

Im zusätzlich erfolgten Pestizid-Screening konnten sieben der 73 untersuchten Substanzen gefunden werden. Die gefundenen Substanzen sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2: Positive Befunde beim Pestizid-Screening

Fungizide	Herbizide
Epoxiconazole	Chloridazon
Fenpropimorph	Linuron
Metconazol	Mecoprop-P.
Quinoxifen	

Im Bereich der Arzneimittelwirkstoffe konnten keine signifikanten Unterschiede zu anderen Kläranlagen aufgezeigt werden. Ein Vergleich der ermittelten Werte mit Literaturdaten zeigt eine normale Belastung des Kläranlagenablaufs mit Arzneimittelwirkstoffen auf. So wurden auch von Bergmann et al. [1] in einer aktuellen Zusammenstellung von Monitoringdaten Carbamazepin, Diclofenac, Sulfamethoxazol und die

Röntgenkontrastmittel als Stoffe mit erwarteter hohen Konzentrationen im Kläranlagenablauf identifiziert. Als nicht relevante Stoffe für die weiteren Untersuchungen wurden Naproxen, Phenazon, Atenolol und Diuron identifiziert.

Tabelle 2.3: Darstellung der ermittelten Mittelwerte einiger Leitparameter aus den Bereichen Arzneimittelwirkstoffe, Industriechemikalien und Basisparameter aus drei 24-Stunden Mischproben des Abflaufs der Kläranlage Warburg im Vergleich mit Werten weiterer kommunaler Kläranlagen.

		KA Warburg *	KA S**	KA BS**	KA DV**
		[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]	[ng/l]
Arzneimittelwirkstoffe	Carbamazepin	940	1.100	1.300	1.800
	Diclofenac	1.100	3.000	4.900	1.271
	Sulfamethoxazol	700	1.000	710	649
	Amidotriozoesäure	600	8.800	450	800
	Iopromid	800	450	1.100	200
	Iomeprol	780	1.800	380	800
	Iopamidol	1.800	200	1.500	< BG
Industriechemikalien	Benzotriazol	2.300	2.600	2.100	1.400
	Bisphenol A	100	97	91	29
Basisparameter	Gelöster organischer Kohlenstoff	7 mg/l	6,4 mg/l	6,6 mg/l	5,9 mg/l
	Bromid	130 µg/l	90 µg/l	130 µg/l	90 µg/l

* Darstellung von Mittelwerten (n = 3)

** Darstellung von Mittelwerten (n = 7)

Durch Bromid kann es bei der Ozonierung des Kläranlagenablaufs möglicherweise zur Bildung des Transformationsproduktes Bromat kommen. Ob dies zu Überschreitungen des Trinkwassergrenzwertes von 10 µg/l führt, sollte im Rahmen von Laboruntersuchungen zur Ozonzehrung und zum Bromatbildungspotential überprüft werden. Diese waren nicht Gegenstand der Phase 1.

Aus jetziger Sicht ist eine Überschreitung des Grenzwertes für Bromat bei einer Ozonierung des Ablaufes der KA Warburg unwahrscheinlich, so dass sowohl eine adsorptive als auch oxidative Behandlung vermutlich möglich ist. Versuche zur Ozonzehrung sollen in einer möglichen zweiten Phase durchgeführt werden.

3 Abwasserbehandlung der Kläranlage Warburg

Die Kläranlage Warburg wurde 1974 in Betrieb genommen und Ende der 1980er-Jahre erweitert. Die Stickstoffelimination ist als simultane Denitrifikation ausgeführt und die Phosphorelimination erfolgt durch eine Simultanfällung. Die Kläranlage Warburg ist derzeit für 70.000 EW ausgelegt. An der Kläranlage sind etwa 25.000 Einwohner angeschlossen. Der Zulauf der Kläranlage Warburg ist zeitweilig deutlich von den Einleitungen der örtlichen Zuckerfabrik der Südzucker AG geprägt. Durch den Kampagnebetrieb der Zuckerfabrik steigt der Einwohnerwert zeitweilig auf 30.000 bis 40.000 EW an.

Ein Ziel der Machbarkeitsstudie war die Prüfung, inwiefern vorhandene Bausubstanz ggf. für die Spurenstoffelimination genutzt werden kann. Daher wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie eine Nachbemessung der Kläranlage für die auftretenden unterschiedlichen Belastungszustände durchgeführte. Dabei wurde u. a. zusätzlich die zukünftig geplante geänderte Behandlung der Abwässer der Zuckerfabrik berücksichtigt.

Aus der Nachbemessung ergab sich, dass von den drei vorhandenen Nachklärbecken das älteste, mit einer Wassertiefe von 2 m relativ flache Nachklärbecken, klärtechnisch nicht zwingend erforderlich ist. Bei der Konzeptentwicklung wurde daher die mögliche Einbindung dieses Beckens in Anlagen zur Spurenstoffelimination berücksichtigt.

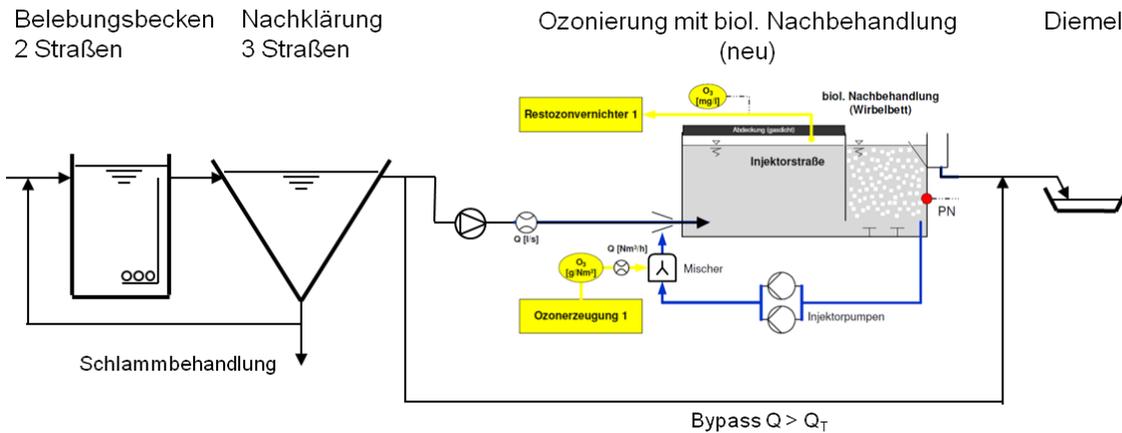


Abbildung 3.1: Luftbild der Kläranlage Warburg (Google Maps)

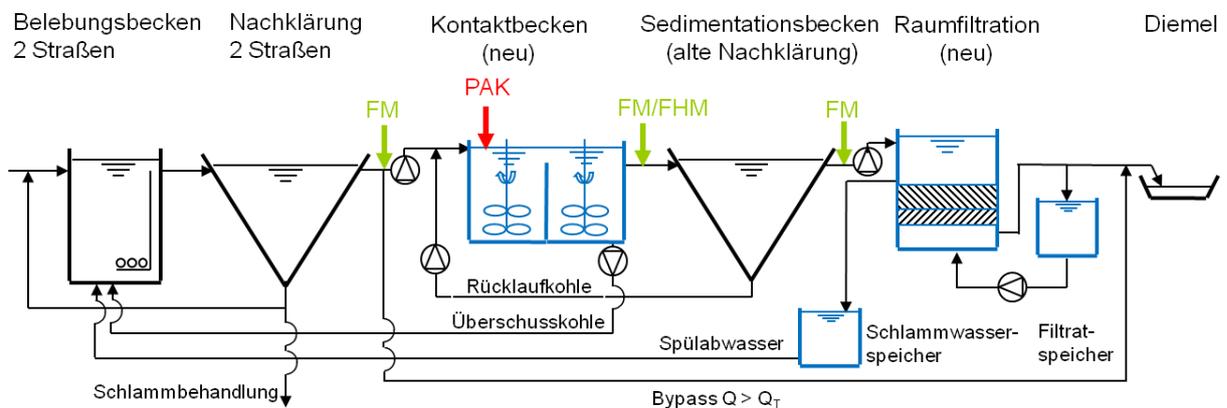
4 Varianten

In der Machbarkeitsstudie wurde eine Variantenbetrachtung verschiedener Verfahrenstechniken für den Einsatz auf der Kläranlage Warburg vorgenommen. Die in dieser Studie untersuchten Varianten mittels Ozonierung, Pulveraktivkohle und granulierter Aktivkohle wurden unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsergebnisse erarbeitet. Die Untersuchung der Varianten geht insbesondere auf die Möglichkeit der verfahrenstechnischen und konstruktiven Umsetzung auf der Kläranlage Warburg ein. Alle Varianten beinhalten eine maximale Beschickung der Stufe zur Spurenstoffelimination bis zu 184 l/s, die eine Behandlung der Trockenwetterwassermenge sicherstellt. Bei Überschreiten dieser Wassermenge im Regenwetterfall wird das übrige Abwasser über einen Bypass abgeführt. Trotz dieser Teilstrombehandlung könnten über 90 % der Jahresabwassermenge behandelt werden. Nachfolgend werden kurz die fünf entwickelten Varianten schematisch dargestellt.

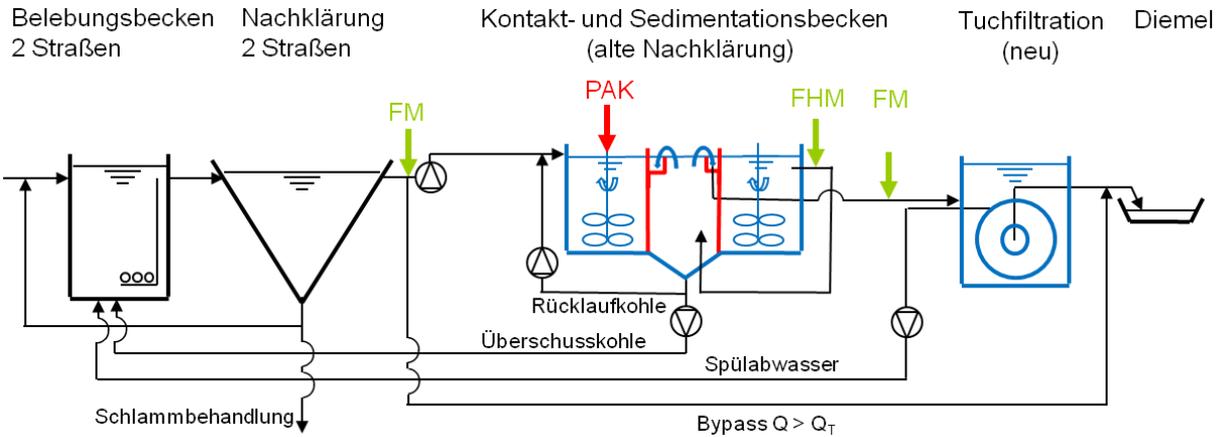
Variante 1: Ozonierung (Injektor) - biologische Nachbehandlung



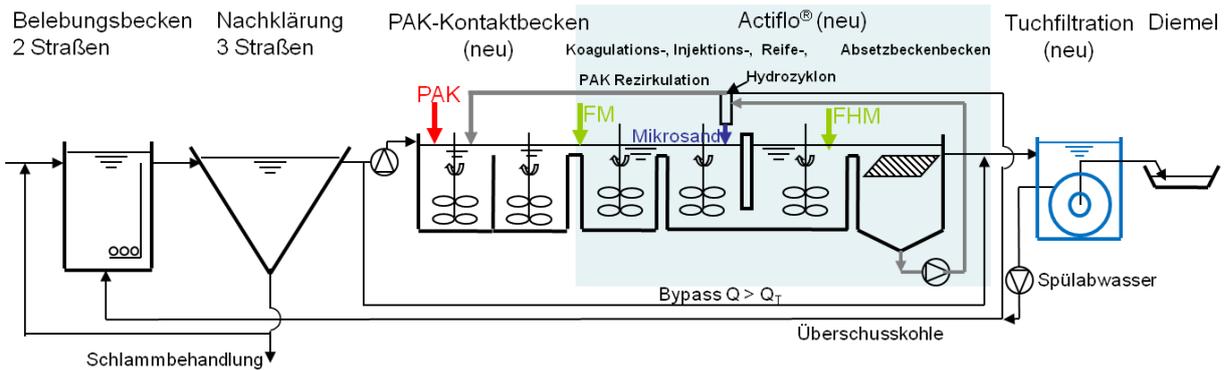
Variante 2a: PAK-Dosierung im Reaktionsraum – Sedimentation – Raumfiltration



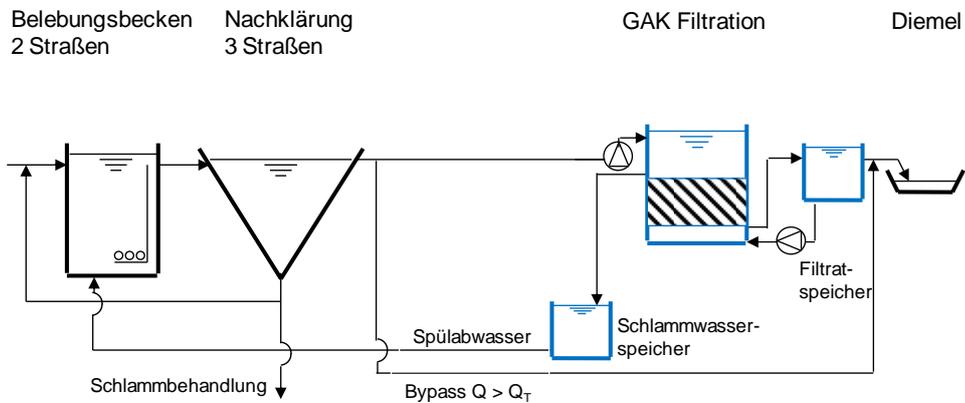
Variante 2b: PAK-Reaktionsraum und Sedimentation im Kombibauwerk – Tuchfiltration



Variante 2c: PAK-Dosierung im Reaktionsraum – Abscheidung im ACTIFLO® - Tuchfiltration



Variante 3: Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK)



Die Abwasserzusammensetzung hat bei allen Varianten einen maßgebenden Einfluss auf die zu erwartende Eliminationsleistung bzw. auf die Dosierung von Betriebsstoffen oder die Standzeit des GAK-Adsorptionsbettes. Die Dosierstoffe und –mengen sind letztlich im Rahmen von Vorversuchen in Ab-

hängigkeit von den Spurenstoffen und des gewählten Verfahrens zu erproben und später in der Inbetriebnahme- und Betriebsoptimierungsphase zu verifizieren. Vorversuche zur Verfahrenswahl waren jedoch nicht Gegenstand dieser Studie.

Die Investitionskosten und Betriebskosten wurden für jede Variante abgeschätzt. Die Ermittlung der Jahreskosten erfolgte nach den Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen der LAWA mit einem realen Zinssatz von $i = 3,0\%$ und Nutzungsdauern von 30 Jahren für Bautechnik und 15 Jahren für die eingesetzte Maschinen- und EMSR-Technik über einen Nutzungszeitraum von $n = 30$ Jahren.

In der nachfolgenden Tabelle sind die abgeschätzten Kosten für die einzelnen Varianten gegenübergestellt. Dabei wurden keine Fördermittel für den Anlagenumbau/-erweiterung und Reduzierungen aus der Abwasserabgabe berücksichtigt.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Investitions-, Betriebs- Kapital- und Jahreskosten sowie spezifische Jahreskosten bezogen auf die behandelte Schmutzwassermenge der betrachteten Varianten

Variante	V 1 Ozonierung - biologische Nachbehandlung	V 2a PAK-Dosierung im Reaktionsraum – Sedimentation - Raumfiltration	V 2b PAK-Reaktionsraum und Sedimentation im Kombibauwerk - Tuchfiltration	V 2c PAK-Dosierung im Reaktionsraum – Abscheidung im ACTIFLO® - Tuchfiltration	V 3 Filter mit granulierter Aktivkohle (GAK)
Investitionskosten (netto)	1.728.000 € <small>107%</small>	2.820.000 € <small>175%</small>	1.610.000 € <small>100%</small>	2.350.000 € <small>146%</small>	2.185.000 € <small>136%</small>
Kapitalkosten	126.075 € <small>58%</small>	195.779 € <small>47%</small>	112.596 € <small>37%</small>	164.104 € <small>46%</small>	150.283 € <small>44%</small>
Betriebskosten	92.680 € <small>42%</small>	221.250 € <small>53%</small>	189.550 € <small>63%</small>	189.550 € <small>54%</small>	194.100 € <small>56%</small>
Jahreskosten (netto)	218.755 € <small>100%</small>	417.029 € <small>191%</small>	302.146 € <small>138%</small>	353.654 € <small>162%</small>	344.383 € <small>157%</small>
spezifische Jahreskosten (Jahresabwassermenge 3,17 Mio m³)	0,069 €/m³	0,132 €/m³	0,095 €/m³	0,112 €/m³	0,109 €/m³
(Wasserverbrauch 1,29 Mio. m³)	0,170 €/m³	0,323 €/m³	0,234 €/m³	0,274 €/m³	0,267 €/m³

Bei der Ermittlung der spezifischen Kosten wurde als Bezugsgröße die zu behandelnde Abwassermenge in Höhe von ca. 3,17 Mio. m³/a und zum anderen die Frischwassermenge (1,29 Mio. m³/a, Stand 2012) angesetzt, die einen Rückschluss auf eine Anpassung der Abwassergebühren ermöglicht. Es ergeben sich für die unterschiedlichen Verfahren Mehrkosten der zusätzlichen Verfahrensstufe in Höhe von 0,069 bis 0,132 € je m³ behandeltes Abwasser bzw. 0,17 bis 0,323 € je m³ Frischwasser.

5 Bewertung der Varianten und Verfahrensempfehlung

Zunächst sind einige Grundvoraussetzungen zur Anlagenerrichtung darzustellen, die unabhängig von den Varianten zu sehen sind:

1. Die Anlagen werden auf den maximalen Trockenwetterzufluss ausgelegt, d.h. bei Regenwetter wird die Wassermenge, die den Bemessungsfluss übersteigt, im Bypass abgeleitet.
2. Nach heutigem Kenntnisstand sind insbesondere Ozon und die Aktivkohleadsorption für die Spurenstoffelimination geeignet. Beide Verfahren können eine große Bandbreite von Mikroverunreinigungen aus Kläranlagenabläufen entfernen. Keines der Verfahren ist jedoch in der Lage alle Spurenstoffe mit vertretbarem Aufwand zu eliminieren.
3. Die Aufwendungen für die Betriebsstoffe beeinflussen maßgeblich die Jahreskosten der Anlagen. Diese sind im Wesentlichen Strom und Reinsauerstoff für die Ozonierung, Pulveraktivkohle oder granuliert Aktivkohle. Die Kosten sind abhängig von der notwendigen Dosierung oder erzielbaren Standzeit des GAK-Filters, welche wiederum von den Konkurrenzstoffen, wie z.B. CSB und AFS abhängen.
4. Aufgrund der Kosten für die Betriebsstoffe sollte der Zulauf zur Spurenstoffelimination möglichst wenige Konkurrenzstoffe aufweisen, so dass eine optimale biologische Abwasserbehandlung mit einer gut funktionierenden Nachklärung Grundvoraussetzung ist.
5. Für die mit der Herstellung einer Spurenstoffeliminationsanlage anfallenden Kosten inkl. der Aufwendungen einer erforderlichen Anlagenoptimierung nach Bauabschluss sind derzeit Fördermittel von bis zu 70 % beim Land NRW bis Ende 2013 und danach 60 % zu erhalten.
6. Für die Umsetzung der Varianten mit PAK ist eine landwirtschaftliche Klärschlammverwertung nicht mehr möglich, da der PAK-Schlamm über die Schlammbehandlung entsorgt wird.
7. Für eine genaue Anlagenauslegung sind insbesondere hinsichtlich der Ozonzehrung, der PAK-Dosierung und GAK-Standzeit entsprechende Laboruntersuchungen (Ozonzehrungsversuche, PAK-Dosiersversuche und GAK-Filterbettversuche) erforderlich.

Auf Basis der Kostenabschätzung sowie betrieblicher und baulicher Aspekte wurden die unterschiedlichen Verfahren bewertet. Bei der Ermittlung der Investitionskosten wurden zunächst keine Förderungen des Landes eingerechnet. Ebenso wurden Kostenreduzierungen der Abwasserabgabe z.B. durch eine weitergehende Reduzierung der CSB- und Phosphor-Konzentration im Kläranlagenablauf nicht berücksichtigt.

Von großer Bedeutung sind die Kosten (hier in Form von Kapital- und Betriebskosten, die in Summe die Jahreskosten ausmachen), die zu erwartenden Eliminationsleistungen der Spurenstoffe wie auch der CSB-Reduzierung. Die monetären und die betrieblich/baulichen Aspekte wurden zu jeweils 50% gewichtet.

Hinsichtlich der Investitionskosten und Betriebskosten sind die Betriebskosten von größerer Bedeutung für die Jahreskosten, da in der Technik der Abwasserbehandlung lange Nutzungszeiträume und Abschreibungszeiträume die Regel sind und somit die kapitalisierten Investitionskosten oft geringer sind. Daher wurde eine Gewichtung von 30 % Kapitalkosten und 70 % Betriebskosten gewählt. Dies ergibt bei einer Gewichtung von 50 % für monetäre Aspekte die prozentuale Gewichtung in Tabelle 5.1. Dabei wurden 15 Punkte jeweils für die niedrigsten Kapitalkosten und Betriebskosten vergeben. Die Kosten zwischen dem niedrigsten Betrag und dem höchsten Betrag wurden punktmäßig linear bewertet.

An betrieblichen und baulichen Aspekten wurden bewertet:

- Eliminationsleistung Spurenstoffe
- Verbesserung der Reinigungsleistung (CSB, AFS, P_{ges})
- Betriebs- und Wartungsaufwand infolge der Integrierung der Verfahrenstechnik und den zusätzlichen Aggregaten
- Stand der Technik – Wissenschaft (Umsetzung vergleichbarer Referenzlage bzw. Erfahrungen in unterschiedlichen Pilotprojekten oder Forschungsanlagen mit den vorgestellten Techniken)
- Integration in die KA Warburg (Beeinflussung der vorhandenen Abwasserbehandlung, verfahrenstechnische Anbindung und räumliche Anordnung auf der KA Warburg)

Für die Bewertungsparameter der technischen Aspekte wurde ein Bewertungssystem in Anlehnung an Schulnoten vergeben und dieses mit Punkten belegt. Zudem wurde eine verbale Bewertung in der Tabelle 5.1 vorgenommen. Die Note 1 entspricht 15 Punkten, die Note 2 entsprechend 10 Punkten und die Note 3 entspricht 5 Punkten. Die kleinste Teilung sind Halbnotenschritte (2,5 Punkte). Die einzelnen Bewertungskriterien wurden gewichtet.

Für die technischen Aspekte (Wichtung in 5%-Schritten) hat die Elimination der Spurenstoffe die größte Bedeutung, daher eine Wichtung von 20 %. Direkt im Ranking dahinter wird eine mit der Behandlung gesehene Verbesserung der sonstigen Überwachungsparameter gesehen (Wichtung 10 %). Gleichrangig gewichtet wurde der Betriebs- / Wartungsaufwand. Die verbleibenden Aspekte (Stand der Technik-Wissenschaft, Integration in die KA Warburg) wurden mit 5 % gewichtet. Die einzelne Wertung eines Aspektes ergibt sich aus der Multiplikation von Wichtung [%] * Punkte [Zahl].

In der nachfolgenden Tabelle 5.1 werden die unterschiedlichen Varianten relativ zu einander bewertet. Je höher die Punktzahl ist, umso „besser“ ist die Bewertung der Variante.

Tabelle 5.1: Bewertung der Varianten

Variante	Wichtung [%]	V 1		V 2a		V 2b		V 2c		V 3	
		Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung	Punkte	Wertung
Investitionskosten		1.728.000 €		2.820.000 €		1.610.000 €		2.350.000 €		2.185.000 €	
Rest-Investitionskosten bei 60% Förderung		691.200 €		1.128.000 €		644.000 €		940.000 €		874.000 €	
Kapitalkosten	15%	126.075 €	13,4	195.779 €	8,6	112.596 €	2,3	164.104 €	10,3	150.283 €	11,2
Betriebskosten	35%	92.680 €	15,0	221.250 €	6,3	189.550 €	2,6	189.550 €	7,3	194.100 €	7,2
Wertungspunkte Monetär (gerundet)	50%		7,3		3,5		4,8		4,1		4,2
Eliminationsleistung Spurenstoffe (Schulnoten 1 (15 Pkt) bis 3 (5 Pkt))	20%	gut	10,0	gut	10,0	gut	10,0	gut	10,0	noch gut	7,5
Verbesserung der Reinigungsleistung CSB, AFS, Pges (Schulnoten 1 (15 Pkt) bis 3 (5 Pkt))	10%	mittel	5,0	sehr gut	15,0	noch sehr gut	12,5	noch sehr gut	12,5	gut	10,0
Betriebs- und Wartungsaufwand (Schulnoten 1 (15 Pkt) bis 3 (5 Pkt))	10%	noch gering	12,5	noch mittel	7,5	mittel	10,0	mittel	10,0	mittel	10,0
Stand der Technik - Wissenschaft Referenzlage (Schulnoten 1 (15 Pkt) bis 3 (5 Pkt))	5%	größentechnisch erprobt	15,0	größentechnisch erprobt	15,0	teilw. größentechnisch erprobt	12,5	teilw. größentechnisch erprobt	12,5	in Versuchen erprobt	7,5
Integration in die KA Warburg (Schulnoten 1 (15 Pkt) bis 3 (5 Pkt))	5%	sehr gut	15,0	noch gut	7,5	gut	10,0	sehr gut	12,5	sehr gut	15,0
Wertungspunkte Technik (gerundet)	50%		5,3		5,4		5,4		5,5		4,6
Gesamtpunkte (gerundet)	100%		12,5		8,9		10,2		9,6		8,8

Die Variante 1 – Ozonierung und biologische Nachbehandlung des Kläranlagenablaufs – zeichnet sich durch relativ geringe Kapitalkosten und den geringsten Betriebskosten aus. Ggf. könnten die Kapitalkosten sogar noch durch die Umrüstung des alten Nachklärbeckens weiter gesenkt werden. Die Eliminationsleistung für Spurenstoffe wird insgesamt gleich gut wie die der PAK-Behandlung eingeschätzt. Eine abschließende Bewertung ist jedoch erst nach Versuchen zur Ozonzehrung bzw. PAK-Adsorption möglich. Durch die Ozonierung werden organische Stoffe aufgespalten und in weiten Teilen anschließend mineralisiert. Im Gegensatz zu den anderen Varianten 2 bis 3 mit einer zusätzlichen Filtration geht von der Ozonierung kein positiver Effekt für den Rückhalt von Suspensa und somit auf die Konzentration der AFS und Phosphat-Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) aus. Die Ozonierung ist ein vergleichsweise wartungsarmes Verfahren. Der wesentliche Aufwand ist auf die Wartung der erforderlichen Mess- und Maschinenteknik zurückzuführen. Die großtechnisch erprobte Ozonierung kann auf der Kläranlage Warburg sehr gut integriert werden. Im Ablaufbereich ist eine geeignete Freifläche vorhanden und die Errichtung der Anlage hat keine Beeinflussung auf die bisherige Behandlung.

Die Varianten 2a, 2b und 2c, bei denen die Spurenstoffelimination mittels PAK erfolgt, unterscheiden sich auf monetärer Seite maßgeblich durch die Wahl der erforderlichen Filterstufe und die Nutzung bestehender Becken. Die Variante 2b weist durch die Nutzung des alten Nachklärbeckens in Kombination mit einer nachgeschalteten Tuchfiltration die geringsten Investitionskosten aller Varianten auf. Die Variante 2a ist durch den Neubau einer Raumfiltration die insgesamt teuerste Variante und stellt hier nur eine Referenz dar. Aufgrund der gleichen realisierbaren Kontaktzeit der PAK und der Rezirkulation des Kohleschlammes wird die Spurenstoffelimination der drei Untervarianten gleich hoch bewertet. Die Verbesserung der Reinigungsleistung für CSB, AFS und P_{ges} ist durch die PAK-Adsorption und Filtration bei allen Untervarianten sehr gut. Der Raumfiltration wird dabei eine besonders effektive Wirkung zugesprochen. Die Variante 2a ist großtechnisch erprobt. Für die Varianten 2b und 2c liegen großtechnische Erfahrungen mit der Tuchfiltration noch nicht vor. Das ACTIFLO[®]-Verfahren ist im Trink- und Abwasserbereich erprobt. Grundsätzlich können alle drei Untervarianten auf der Kläranlage Warburg mit vertretbarem Aufwand integriert werden. Vorteilhaft wird der geringe Platzbedarf der Tuchfiltration in Variante 2b und 2c sowie in Variante 2c der Verzicht auf die Umnutzung des alten Nachklärbeckens gewertet. Grundsätzlich könnte jedoch auch das ACTIFLO[®]-Verfahren der Variante 2c in das bestehende Nachklärbecken integriert werden, falls das Nachklärbecken zukünftig nicht mehr weiter betrieben wird. Allen PAK-Varianten ist zudem gemein, dass durch die PAK im Klärschlamm dieser nicht mehr landwirtschaftlich verwertet und thermisch entsorgt werden muss.

Die Variante 3 hat infolge des erforderlichen Neubaus einer Filteranlage ebenfalls relativ hohe Kapitalkosten. Oftmals wird die GAK-Adsorption auf Kläranlage mit bestehender Sandfiltration als Lösungsvariante diskutiert, bei denen mit geringem baulichem Aufwand nur das Filtermaterial gegen GAK ausgetauscht werden muss. Dieser Verfahrensvorteil der GAK kann auf der Kläranlage Warburg nicht genutzt werden. Durch die begrenzte Standzeit der GAK sind zudem die Betriebskosten relativ hoch. Die erreichbare Standzeit kann nur mit größeren Unsicherheiten abgeschätzt werden, da bisher nur einige wenige, begrenzt übertragbare großtechnische Versuche zur Standzeit vorliegen. Insbesondere sollen jedoch ein hoher AFS und DOC im Zulauf zum Filter die erzielbaren Bettvolumina reduzieren. Für eine abschließende Festlegung der Standzeit werden daher zwingend Säulenversuche empfohlen. Durch die gewählte einstufige Verfahrensweise der GAK-Filtration mit weitestgehender Ausnutzung der Adsorptionskapazität des Filterbetts muss teilweise ein Ansteigen der Ablaufkonzentration der Spurenstoffe und der gelösten Hintergrundbelastung geduldet werden. Die Reinigungsleistung wird mit Ausnahme der partikulären Stoffe als etwas geringer als bei der Ozonierung und der PAK-Behandlung angesehen. Analog zur Variante 1 kann auch in Variante 3 das alte Nachklärbecken wie bisher betrieben werden und es ist keine Umstellung der Schlammmentsorgung notwendig.

Als Ergebnis der Ausführungen der Machbarkeitsstudie und damit als Empfehlung wird gegeben, eine Anlage entsprechend der Variante V1, V2b oder V2c weiter zu verfolgen. Die endgültige Verfahrenswahl sollte durch Laboruntersuchungen zur Ozonzehrung und erforderlichen PAK-Dosierung sowie PAK-Produkten getroffen werden.

Aus heutiger Sicht ist die Variante 1 – Ozonierung – die insgesamt vorteilhafteste Lösung. Sollte sich bei den Laboruntersuchungen die PAK-Behandlung als deutlich effektiver als die Ozonierung herausstellen, wird Variante 2b empfohlen, sofern der Verzicht auf das alte Nachklärbecken betrieblich möglich ist. Alternativ bietet die Variante 2c eine Alternative ohne die Nutzung von vorhandener Bausubstanz.

Als weiteres Vorgehen wird vorgeschlagen, die Studie weiter zu vertiefen. Dazu sind Laborversuche zur Ozonzehrung und zur PAK-Dosierung mit unterschiedlichen Pulveraktivkohlen erforderlich. Anhand der Versuchsergebnisse sind ggf. die Annahmen zur Abschätzung der Betriebskosten anzupassen. Ferner wird empfohlen für die Variante 1 und 2c zu prüfen, inwiefern das vorhandene Nachklärbecken für die Ozonierung oder das ACTIFLO[®]-Verfahren umgebaut werden kann und ob hierdurch Kosten eingespart werden können. Im Rahmen einer weitergehenden Betrachtung der Variante 1 sollte ferner vor Ort geprüft, inwiefern ggf. eine Ozonanlage im Freigefälle beschickt werden könnte.

6 Literaturverzeichnis

[1]	Bergmann, A., et al., (2011), Abschlussbericht zum Umweltbundesamt Forschungsvorhaben „Zusammenstellung von Monitoringdaten zu Umweltkonzentrationen von Arzneimitteln“
[2]	DWA, DVGW und Wasserchemische Gesellschaft, (2009), politisches Konzeptpapier: Anthropogene Spurenstoffe im Wasserkreislauf - Forderungen an Politik, Hersteller, Anwender, Verbraucher sowie Ver- und Entsorger; http://www.dwa.de/portale/dwa_master/dwa_master.nsf/home?readform&objectid=BD581F382C894D33C125758600378921 (Download 17.08.2010)
[3]	Grünebaum, T., et al., (2011), Abschlussbericht zum MKULNV Forschungsvorhaben Elimination von Arzneimitteln und organischen Spurenstoffen: Entwicklung von Konzeptionen und innovativen, kostengünstigen Reinigungsverfahren, Schlussbericht Phase 1 „Teilprojekt 6 - Elimination von Arzneimittelrückständen in kommunalen Kläranlagen“,.
[4]	Pinnekamp, J.; Merkel, W., (2008), Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Senkung des Anteils organischer Spurenstoffe in der Ruhr durch zusätzliche Behandlungsstufen auf kommunalen Kläranlagen – Güte- und Kostenbetrachtungen“, Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW. MUNLV (2008), Bearbeiter: Tacke; Herbst; Köster; Beier; Bergmann, Mälzer

7 Anhang

Untersuchungsergebnisse des Screening des Kläranlagenablaufs der Kläranlage Warburg

IUTA-Bez.	M121214/13	M121214/14	M121214/15	M121217/155	
Kunden-Bez.	24h Probe	24h Probe	24h Probe	Erdtransport-	
	10.-11.12.12	11.-12.12.12	12.-13.12.12	wasser	
	[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]		
Arzneimittelwirkstoff	Metoprolol	610	750	930	n.b.
	Carbamazepin	970	860	1000	n.b.
	Diclofenac	1100	1000	1300	n.b.
	Sulfamethoxazol	1100	610	490	n.b.
	Sotalol	104	92	130	n.b.
	Bisoprolol	94	88	110	n.b.
	Bezafibrat	300	600	890	n.b.
	Oxazepam	150	130	150	n.b.
	Naproxen	< 10	< 10	< 10	n.b.
	Clarithromycin	420	230	230	n.b.
	Phenazon	40	33	37	n.b.
	Atenolol	41	44	73	n.b.
	RKM	Amidotrizoesäure	665	499	645
Iopromid		244	1672	486	n.b.
Iopamidol		2986	1248	1116	n.b.
Iomeprol		13	18	2307*	n.b.
Hormone	17-alpha-Ethinylestradiol	< 2,5	< 2,5	< 2,5	n.b.
	17-beta-Estradiol	< 0,5	< 0,5	< 0,5	n.b.
	Estron	< 0,1	< 0,1	< 0,1	n.b.

IUTA-Bez.		M121214/13	M121214/14	M121214/15	M121217/155
Kunden-Bez.		24h Probe, 10.-11.12.12	24h Probe 11.-12.12.12	24h Probe 12.-13.12.12	Erdtransport- wasser
		[ng/L]	[ng/L]	[ng/L]	
Phenole	Bisphenol A	120	80	110	n.b.
	Nonylphenol	< 50	< 50	420	n.b.
	Octylphenol	< 10	< 10	60	n.b.
Süßstoffe	Acesulfam	220	970	2200	n.b.
	Sucralose	130	110	120	n.b.
	Saccharose	n.b.	n.b.	n.b.	< 2,5 [g/L]
sonstige Stoffe	DEHP	< 100	410	3600	n.b.
	Terbutryn	130	110	160	< 1
	Isoproturon	73	97	71	70
	Diuron	11	15	11	< 1
	Benzotriazol gelöster Kohlen- stoffanteil (DOC)	2000 8 mg/L	2000 6,6 mg/L	2800 7,1 mg/L	n.b.
	Bromid	110 µg/L	130 µg/L	140 µg/L	n.b.
	Pestizid-Screening positiv	Fenpropimorph, Epoxiconazole, Chloridazon, Linuron, Mecoprop-P, Metconacol	Fenpropimorph, Chloridazon, Linuron, Mecoprop-P, Metconacol	Fenpropimorph, Chloridazon, Linuron, Mecoprop-P, Metconacol	Fenpropimorph, Chloridazon, Mecoprop-P, Quinoxifen, Fenpropidin

* Iomeprol: analytisch o.k. --> vermutliche Anwendung in Krankenhaus oder Röntgenpraxis Mo/Di

Substanzliste des Pestizid-Screenings :

Cypermethrin	Propaquizafop	Pendimethalin
Azoxystrobin	Propiconazole	Prosulfocarb
Cyfluthrin	Pyraclostrobin	Prothioconazole
Clethodim	Quinmerac	Metolachlor
Clopyralid	Tefluthrin	Spiroxamine
Clothianidin	Tepraloxydim	Tebuconazole
Cycloxydim	Tetraconazole	Terbutylazin
Deltamethrin	Thiamethoxam	Terbutryn
Desmedipham	Thiophanat-methyl	Carbetamid
Difenoconazole	Trifloxystrobin	Quinoxifen
Diemethenamide	Triflusalforon-methyl	Chloridazon
Dimethoate	Lenacil	Metconazol
Epoxiconazole	Alachlor	Chlorbromuron
Ethofumesate	Atrazin	Monuron
Fenpropidin	Chlorfenvinphos	Picoxystrobin
Flusilazole	Simazine	Metobromuron
Glufosinate	Aclonifen	Metformin
Haloxyfop	Bifenox	Linuron
Imidacloprid	Dichlorvos	Fenofibrat
Kresoxim-methyl	Boscalid	Dapson
lambda-Cyhalothrin	Fenpropimorph	Diazinon
Metamitron	Flufenacet	Isoproturon
Phenmedipham	Folpet	
Primicarb	Mepiquat	
Prochloraz	Metazachlor	