

VI VERFAHRENSTECHNISCHE ANLAGEN

A KOMMUNALE KLÄRANLAGEN

Unter **Abwasser** versteht man das **Schmutzwasser**, das durch den Gebrauch von Trinkwasser in Haushalten, im Gewerbe, in landwirtschaftlichen Betrieben oder sonstigen Stellen in den Abwasserkanal fließt.

Bei Niederschlägen kommt das **Regenwasser** hinzu, das nicht im Erdreich versickert.

Industrielles Abwasser muss separat gesammelt, behandelt oder entsorgt werden, wenn es Schadstoffe (z.B. Schwermetalle) enthält, die eine Umweltbelastung für die Gewässer darstellen und die in kommunalen Kläranlagen nicht entfernt werden können.

Was ist alles im Abwasser?

Ausgehend von privaten Haushalten denkt man zunächst vermutlich an menschliche Ausscheidungen, Wasch- bzw. Putzmittel und Lebensmittelreste.

Aber zuhause kommt noch einiges hinzu, das Abwasser aus allen anderen Gebäuden und alles was in den Abwasserkanal fließt kommt hinzu.

Man findet somit fast alles: Chemikalien, Pflanzenschutzmittel, Kosmetikrückstände, Arzneimittel, Mikroplastik (aus Kosmetika und Kleidung), nicht gelöster Zellstoff, Sand, Gegenstände.

Nachfolgend ein (nicht vollständiger) Versuch, die Bestandteile im Wasser zu gruppieren:

- Absetzbare Stoffe
- Abfiltrierbare Stoffe
- Kohlenstoffverbindungen
- Stickstoffverbindungen (Ammonium NH_4^+ , Nitrate NO_3^- , Nitrite NO_2^-)
- Organische Stickstoffverbindungen
- Anorganische Phosphorverbindungen
- Organische Phosphorverbindungen
- Schwermetalle: Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber, Nickel, Blei, Zink u.a.
- Organische Schadstoffe (Halogenkohlenwasserstoffe, Benzol-Toluol-Xylol-Verbindungen, polychlorierte Biphenyle, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe u.a.)

Das in einer **Kläranlage** (**»station d'épuration«**) durch den Abwasserkanal ankommende Abwasser wird zunächst hochgepumpt, so dass es fast die gesamte Kläranlage aufgrund der Schwerkraft durchströmt.

Hierzu werden entweder Archimedes-**Schneckenschrauben** verwendet, die unempfindlich gegen grobe Schmutzteilchen sind, oder **Zentrifugalpumpen**, die einen wesentlich höheren Wirkungsgrad haben und größere Höhenunterschiede überwinden können.

In der Kläranlage der Gemeinde Luxemburg („Ville de Luxembourg“, abgekürzt VdL) befindet sich in Luxemburg-Beggen. Hier fördern, abhängig vom Zufluss, bis zu 4 Pumpen mit einem maximalen Volumenstrom von jeweils $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ das Abwasser aus einer Tiefe von 6 Metern nach oben. Täglich werden bei Trockenwetter z. Zt. ca. 30000 m^3 gepumpt, an und nach Regentagen sind es bis zu 80000 m^3 .

In näherer Zukunft werden vier zusätzliche Pumpen das Abwasser aus einem weiteren Stadtteil (Bonnweg) aus 12 Metern Tiefe hochpumpen.

Bevor das Wasser in die Reinigungsstufen kommt, stehen Überläufe bereit für die Perioden mit starkem Niederschlag. Regenüberlaufbecken oder Regenrückhaltebecken halten einen großen Teil des Regnwassers zurück, um die Kläranlage nicht mit zu großen Wassermengen zu überlasten bzw. um Überschwemmungen zu vermeiden.

Das zurückgehaltene Regenwasser wird entweder in diesen Becken geklärt, da es ohnehin recht sauber ist, oder in den darauffolgenden Tagen (mit wenigem oder ohne Niederschlag) nach und nach in der Kläranlage gereinigt.

In der Gemeinde Luxemburg befinden sich 18 Becken im Abwasserkanalsystem, also vor der Kläranlage.

1. Mechanische Reinigungsstufe

Als **erste Reinigungsstufe** erfolgt die **mechanische Klärstufe**, wo klassische Verfahren zum Abscheiden von festen Teilchen wie Sand, Schlamm und aufschwimmende Teile verwendet werden. Es handelt sich um rein physikalische Trennvorgänge.

In einem ersten Becken werden die Feststoffe durch **Rechen** (Abb.1) zurückgehalten. Der grobe Schmutz kommt nicht zwischen Gitterstäben hindurch, während das Wasser weiter strömt.

Ist der Rechen belegt, bewegt er sich automatisch weiter und entfernt die angefallenen Feststoffe. Dieses so genannte **Rechengut** wird mit Wasser gewaschen, um die organischen Bestandteile auszuwaschen und dann zusammengepresst, um es zu entwässern und zu kompaktieren. Abschließend wird es **deponiert** oder **thermisch entsorgt**.

In Beggen werden die Abfälle aus drei Becken mit Stufenrechen mit zwei Rechengutwäschern gereinigt. Anschließend wird das Rechengut der Müllverbrennungsanlage der SIDOR thermisch entsorgt. Dabei wird Strom und Wärme produziert.

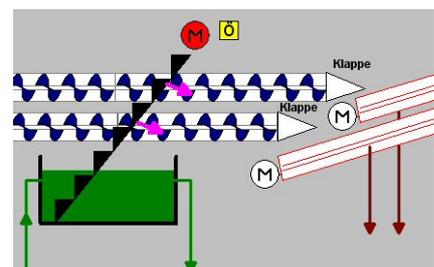


Abb. 1: Rechenfang
(Quelle: VdL)

Dann fließt das Wasser in den **Fett- und Sandfang**, in dem sich **Fäkalstoffe** und **Sandteilchen** absetzen. Durch Eindüsen von Luft werden **Fettteilchen** aufgeschwemmt (**Flotationverfahren**) und können von der Wasseroberfläche abgeschöpft werden.

In Beggen werden in drei Fett- und Sandfängen (Abb.2) mit je drei Tauchbelüftern besonders **feine Luftbläschen** hergestellt. Dieses Flotationsverfahren bewirkt ein Aufschwimmen des Fettes. In den drei Becken bewegt sich je eine Räumerrücke mit zwei Schabern hin und her. Letztere kratzen den abgeschiedenen Sand beziehungsweise das an der Oberfläche schwimmende Fett zusammen.

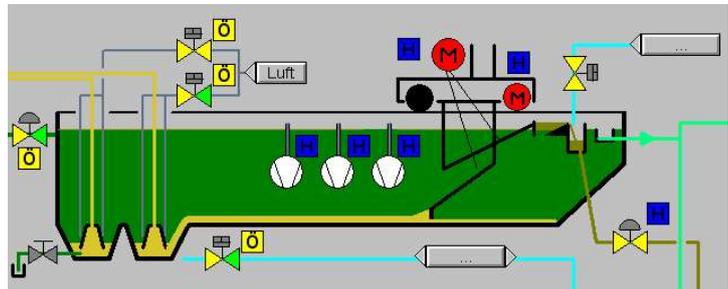


Abb.2: Fett- und Sandfang (Quelle: VdL)

Das in eine Rigole geschobene Fett wird mit Pumpen abgesaugt, kommt zunächst in ein **Schlammischbecken** (Abb.6) und von dort in die **Faultürme** (Abb.9).

Der Sand ist noch mit Schlamm/Fäkalstoffen und Wasser vermischt. Er wird in zwei Sandklassierer gepumpt und dort von den organischen Teilen gesäubert. Der gesäuberte und getrocknete Sand wird in einer Deponie entsorgt.

In einem nächsten Schritt werden klassischer Weise große **Vorklärbecken** eingesetzt, in denen sich die organischen Bestandteile unter der Wirkung der **Schwerkraft** absetzen. Hierzu muss die Fließgeschwindigkeit des Abwassers sehr gering sein. Der sedimentierte Schlamm muss aus dem Becken geräumt werden und kommt in den Faulturm.

In Beggen folgen zwei **Koagulationsbecken** (Abb.3), in die dem Abwasser ein **Polymer** und **Eisen(III)-chlorid ($FeCl_3$)** zugemischt werden. Beim Polymer handelt es sich um langkettige Moleküle, das sind Kohlenwasserstoffverbindungen der organischen Chemie.

Am Polymer bleiben verschiedene Verunreinigungen haften, sie **koagulieren**. Die Polymere Moleküle dienen als **Flockungsmittel**, durch das sehr kleine Stoffe **ausgeflockt** werden.

Das Eisen verbindet sich mit den **Phosphorverbindungen (Phosphate PO_4^{3-})** im Abwasser und es entsteht ein Schlamm. Den Vorgang bezeichnet man als **Fällung**.

Der geflockte und der gefällte Schlamm werden durch Rührwerke in Schwebelage gehalten. Das Wasser fließt weiter zu den sechs **Lamellenabscheidern** (Abb.4).

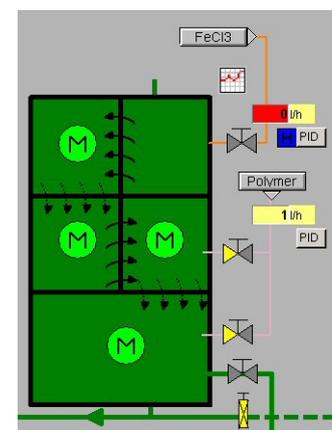


Abb.3: Koagulationsbecken (Quelle: VdL)

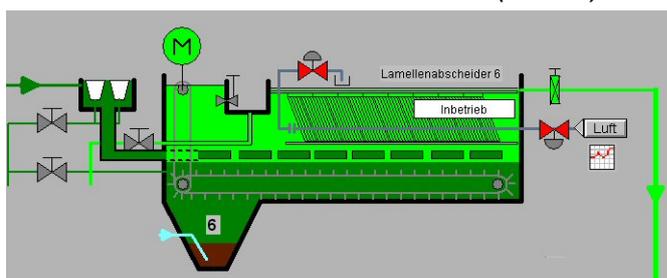


Abb.4: Lamellenabscheider (Quelle: VdL)

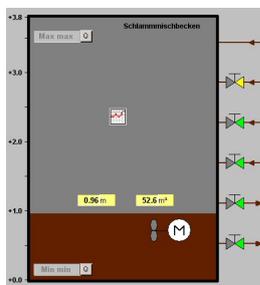
Im Lamellenabscheider setzt sich der Schlamm teilweise am Boden ab. Während das vorgeklärte Wasser zwischen den Lamellen hochströmt, scheidet sich der restliche Schlamm an den Lamellen ab, rutscht an ihnen nach unten und sammelt sich am Boden.

Ein Kettenräumer räumt den ausgefällten Schlamm in eine Vertiefung des Beckens, von der aus Pumpen ihn in einen der beiden **Frischschlammeindicker** (Abb.5) fördern.

In diesem Anlagenteil findet in Luxemburg-Beggen demnach bezüglich der Phosphorverbindungen eine **chemische Behandlung** des Abwassers statt.

Im Frischschlammeindicker setzt sich der Frischschlamm ab, er dickt sozusagen ein. Bei einem Trockensubstanzanteil von 4% wird er in das **Schlammmischbecken** (Abb.6) gepumpt.

Das Klarwasser fließt zurück in die Kläranlage.



Das Frischschlammmischbecken dient als Vorlage. Täglich werden ca. 200 m³ Frischschlamm aus den Frischschlammeindickern (Abb.5) und 200 m³ aus dem Flotationsbehälter (Abb.8) in das Becken gepumpt.

Vom Mischbecken aus kommt der Frischschlamm (Trockensubstanzanteil 4%) in die beiden **Faultürme**.

Abb.6: Schlammmischbecken
(Quelle: VdL)

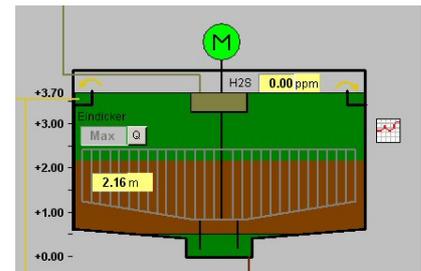


Abb.5: Schlammeindicker
(Quelle: VdL)

2. Biologische Reinigungsstufe

Das Abwasser fließt nun in die **zweite Reinigungsstufe**, die **biologische Stufe**, in der **organische Verunreinigungen** durch **aerobe Mikroorganismen** (Bakterien, Pilze, Protozoen (Einzeller)) abgebaut werden. Ähnlich den natürlichen Vorgängen in den Gewässern dienen die organischen Verbindungen den Mikroorganismen als Nährstoffe, wobei diese zusätzlich Sauerstoff benötigen. Dies geschieht in **Belebtsbecken (Belüftungsbecken)**, in denen die Mikroorganismen sich dann vermehren.

In den dahinter liegenden **Nachklärbecken** wird der **Belebtschlamm** mit den Mikroorganismen vom Wasser getrennt. Ein Teil des Belebtschlammes wird in das Belüftungsbecken zurückgeführt, damit Mikroorganismen in dem Becken sind. Der restliche Belebtschlamm (Überschussschlamm) wird eingedickt und kommt in **Faultürme**.

Die Stickstoff enthaltenden organischen Stoffe im Abwasser wurden zu einem großen Teil bereits im Abwasserkanal abgebaut. Daraus entstanden Hydroxidionen OH⁻ und **Ammoniumionen NH₄⁺**. Im Belüftungsbecken werden diese Ammoniumionen mit dem durch die Luft zugeführten Sauerstoff zunächst zu **Nitriten NO₂⁻** (Gl.1) **oxidiert** und

anschließend zu **Nitrat** NO_3^- (Gl.2) **oxidiert**. Dieser Vorgang wird als **Nitrifizierung** bezeichnet und ist vereinfacht in (Gl.3) zusammengefasst.



Die Nitrationen (NO_3^-) müssen aus dem geklärten Abwasser entfernt werden. Dies erfolgt ebenfalls durch Mikroorganismen, die bei Sauerstoffmangel die Nitrationen zu **Stickstoff N_2 reduzieren**. Dieser Vorgang, die **Denitrifizierung**, läuft in einem **nicht belüfteten Nachklärbecken** oder in einer **nicht belüfteten Zone** des **Belebbeckens** ab.

Der bei der Denitrifizierung freiwerdende Sauerstoff wird von den Bakterien dazu benutzt, organische Verbindungen zu oxidieren. Kohlenwasserstoffverbindungen werden somit zu Kohlenstoffdioxid CO_2 und Wasser H_2O abgebaut. Am Beispiel von Zucker ist dieser Vorgang in Gl.4 dargestellt.



Die **biologische Stufe** erfolgt in Beggen nach dem **Biostyr-**Verfahren. In 12 Betonzellen (Abb.7) von je 113 m^2 Fläche befindet sich je eine 3,5 Meter hohe Schicht an Styropor-Kugeln (Durchmesser ca. 3 mm), an deren Oberfläche sich die Bakterien befinden.

Dabei unterscheiden sich die oberen 2,5 Meter der Schicht von dem unteren Meter. Im unteren, nicht belüfteten Bereich sind heterotrophe Bakterien; im oberen, belüfteten Bereich sind autotrophe Bakterien.

Das vorgeklärte Wasser durchströmt diese Füllkörperschicht von unten nach oben. Im oberen Bereich findet die **Nitrifizierung** statt. Die **Ammoniumionen NH_4^+** werden zu **Nitrationen NO_3^- oxidiert**.

Das nitrathaltige Abwasser, das die Betonzellen verlässt, wird **teilweise rezirkuliert** (wieder zurückgeführt) d.h. unter die Zellen gepumpt. Es durchströmt die Füllkörperschicht erneut. Durch diese **Rezirkulation** findet im unteren, nicht belüfteten Bereich die **Denitrifizierung** statt. Die **Nitrationen NO_3^-** reagieren mit den organischen Verbindungen. Sie werden zu **Stickstoff N_2 reduziert**. Der **Kohlenstoff C** der organischen Verbindungen **oxidiert** mit dem dabei freiwerdendem Sauerstoff zu **Kohlenstoffdioxid CO_2** . Beide Gase verlassen den Reaktor. Vorhandene **Ammoniumionen NH_4^+** reagieren in diesem Bereich nicht.

Das **restliche** nitrathaltige Abwasser, das nicht rezirkuliert wird, wird vier weiteren, nicht belüfteten Biostyr-Zellen zugeführt. Dort reagieren die **Nitrate NO_3^-** mit **Methanol CH_3OH** . Die Nitrate werden wiederum zu **Stickstoff N_2 reduziert**. Der dabei anfallende Schlamm muss ca. zweimal wöchentlich ausgespült werden. Er wird den **Flotationsbecken** (Abb.8) zugeführt.

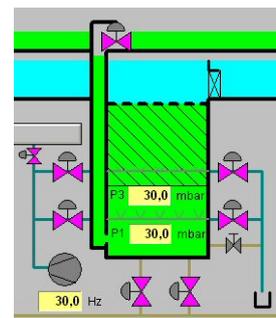


Abb.7: Biostyr-behälter (Quelle: VdL)

Da in den Biostyr-Zellen die Menge an Bakterien permanent zunimmt, müssen die 12 Zellen einmal täglich mit Wasser **gespült** werden.

Der dabei anfallende Schlamm wird mit einem **Flotationsverfahren** (Abb.8) vom Wasser getrennt. Hierzu wird wiederum **Polymer** zum Abwasser gegeben, und zwar zusammen mit Weißwasser, einem Wasser-Luftgemisch unter hohem Druck (ca. 6 bar).

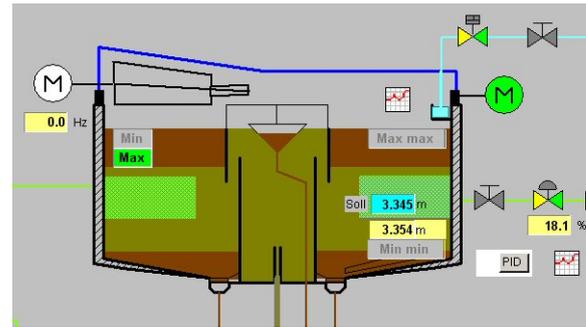


Abb.8: Flotationsbehälter (Quelle: VdL)

Das aufsprudelnde Gemisch reißt die Schlammteilchen mit sich und führt letztendlich zu einer **Schlammsschicht**, die auf der Oberfläche schwimmt („flotiert“). Sie wird **abgeschöpft** und in das **Schlammischbecken** (Abb.6) gepumpt.

Der Vorteil des Biostyr-Verfahrens liegt darin dass keine großflächigen Nachklärbecken erforderlich sind. Allerdings ist der Verbrauch an elektrischer Energie wesentlich höher als bei herkömmlichen Verfahren.

3. Chemische Reinigungsstufe

In einer **dritten Reinigungsstufe**, der **chemischen Stufe**, werden in modernen Kläranlagen die **Phosphationen** PO_4^{3-} aus dem geklärten Abwasser abgeschieden. Dies kann durch eine **Vor-**, **Simultan-** oder **Nachfällung** mit **Eisen(III)-chlorid** FeCl_3 erfolgen. Durch eine chemische Reaktion (Gl.5) entsteht schwer lösliches **Eisenphosphat** FePO_4 .



Neben Eisenchlorid werden auch Eisen(II)salze verwendet, daneben sind Fällungen mit Aluminium- und Calciumionen möglich.

Wie bereits erwähnt, werden in Beggen die **Phosphationen** PO_4^{3-} bereits früher (**Vorfällung**) in **Fällungsbecken** an **Eisenionen** Fe^{3+} gebunden und in **Lamellenabscheidern** vom Abwasser abgetrennt.

Der Schlamm aus den mechanischen und biologischen Anlagenteilen, der nach dem Schlammischbecken in **Faultürme** (Abb.9) gepumpt wurde, wird dort unter Sauerstoffausschuss **anaerob zersetzt**. Das entstehende **Faulgas**, das man auch als Biogas bezeichnen kann, besteht fast ausschließlich aus **Methan** CH_4 und **Kohlenstoffdioxid** CO_2 . Der Methangehalt ermöglicht eine Verstromung oder Verheizung des Gases, wodurch **elektrische** oder **Wärmeenergie** gewonnen werden.

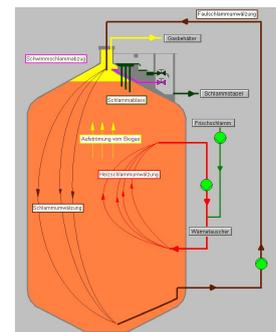


Abb.9: Faulturm (Quelle: VdL)

Der entstehende elektrische Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist, die Wärme wird zu Heizzwecken von Teilen der Kläranlage (z.B. Faultürme und Gebäude) oder anliegenden Häusern verwendet.

Der Klärschlamm

Der Schlamm aus den mechanischen und biologischen Anlagenteilen, der in **Faultürme** (Abb.9) gepumpt wurde, wird dort unter Sauerstoffausschuss **anaerob zersetzt**. Das entstehende **Faulgas**, das man auch als Biogas bezeichnen kann, besteht fast ausschließlich aus **Methan CH₄** und **Kohlenstoffdioxid CO₂**. Der Methangehalt ermöglicht eine Verstromung oder Verheizung des Gases, wodurch **elektrische** oder **Wärmeenergie** gewonnen werden. Der entstehende elektrische Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist, die Wärme wird zu Heizzwecken von Teilen der Kläranlage (z.B. Faultürme und Gebäude) oder anliegenden Häusern verwendet.

Die beiden Faultürme in Beggen haben ein Volumen von je 4500 m³. Der tägliche Durchsatz beträgt ca. 400 m³. Die Verweilzeit in den Faultürmen ergibt sich somit rechnerisch mit mindestens 22 Tagen.

Durch die tägliche Gasproduktion (von ca. 4000 m³) wird ca. ein Drittel der Schlammmasse umgewandelt, so dass der Anteil an Trockensubstanz von 4% auf ca. 3% fällt.

*Der Heizwert des Faulgases schwankt je nach Methangehalt des Faulgases zwischen 5000 und 7000 Wh/m³. Damit werden 2 **Blockheizkraftwerke** betrieben, die je eine **elektrische Leistung** von 600 kW und eine **thermische Leistung** von 750 kW haben.*

Der elektrische Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist.

Die Wärme wird zum Erwärmen der Faultürme, die eine Betriebstemperatur von ca. 37°C brauchen, und unter anderem zum Heizen von Gebäuden (der Kläranlage) verwendet.

Der **Faulschlamm** wird **entwässert**. Dann gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Er wird von Bauern als Humus oder Dünger ausgetragen.
- Er wird deponiert.
- Er wird kompostiert.
- Er wird verbrannt.
- Er wird getrocknet und dann verbrannt.

Bei Verwendungen in der Landwirtschaft müssen Analysen sicherstellen, dass der Faulschlamm keine Schadstoffe (wie z.B. die Schwermetalle Cadmium, Blei oder Quecksilber) enthält, die sonst wieder in den Lebensmittelkreislauf gelangen. Ansonsten muss der Faulschlamm deponiert werden.

In Luxemburg müssen nachfolgende gesetzliche Bedingungen erfüllt sein, damit der Klärschlamm ausgetragen werden darf:

- *Es dürfen maximal 3 Tonnen Schlamm pro ha und Jahr ausgetragen werden.*
- *Die Schadstoffe im Schlamm müssen unter den Grenzwerten liegen.*
- *Der Schlamm muss hygienisiert sein.*
- *Die Schadstoffe im Boden müssen unter den Grenzwerten liegen.*
- *Der pH-Wert der Felder muss stimmen.*
- *Die Fruchtfolgen auf dem Feld müssen stimmen.*
- *Der Schlamm darf nur während bestimmter Monate ausgebracht werden.*

Zur Entwässerung von ca. 7000 Tonnen Faulschlamm jährlich dienen in Beggen **Zentrifugen**, die den Trockengehalt des Faulschlammes von ca. 3% auf 30% erhöht. Dieser Schlamm wird zur Hälfte in der Landwirtschaft ausgetragen. Die andere Hälfte wird zu 2 Dritteln mit Grünschnitt vermischt und kompostiert.

Ausblick

In Zukunft werden bei Kläranlagen vermutlich **vierte** oder gar fünfte **Reinigungsstufen** nötig sein, mit denen beispielsweise gelöste Stoffe wie gefährliche Chemikalien (z.B. Schwermetalle, Benzole), Medikamente (z.B. Antibiotika, Hormone) oder Mikroschadstoffe (insbes. winzige Plastikteilchen) aus dem geklärten Abwasser entfernt werden können. Dies ist durch Verfahren wie Ultrafiltration, Adsorption an Aktivkohle oder Behandlung mit Ozon O₃ möglich.

Der **Mehraufwand** für derartige Behandlungen des geklärten Abwassers ist jedoch erheblich, insbesondere wegen der großen Mengen an Abwasser. Die dabei anfallenden **Mehrkosten** werden den **Abwasserpreis** zukünftig entsprechend verteuern.

*Das geklärte Abwasser der Beggener Kläranlage fließt in den **Fluss Alzette**. Je nach Jahreszeit beträgt seine Temperatur zwischen 7°C und 19°C.*

Ab Ende 2019 wird die Kläranlage vergrößert (Behandlung des Wasseranteils des Klärschlammes nach dem Faulturn) und es wird eine neue Anlage hinzu gebaut, in der in einer 4. Reinigungsstufe u.a. Medikamente mit Hilfe von Ozon und Aktivkohle zerstört bzw. entfernt werden.