



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

UNTERSUCHUNG ÜBER DEN STROMVERBRAUCH BIOLOGISCHER REINIGUNGSVERFAHREN AUF KLÄRANLAGEN

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Stefan Kempf, Ryser Ingenieure AG

Engestrasse 9, 3000 Bern 9, stefan.kempf@rysering.ch, www.rysering.ch

Oskar Sigel, Ryser Ingenieure AG

Engestrasse 9, 3000 Bern 9, oskar.sigel@rysering.ch, www.rysering.ch

Impressum

Datum: 30. November 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Koordinator: felix.frey@bfe.admin.ch

Projekt- und Vertragsnummer: 100673/151077

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Resumée	5
Abstract	5
1. Ausgangslage	7
2. Ziel der Arbeit	8
3. Verfahren zur biologischen Behandlung von Abwasser	9
3.1 Prozesse der biologischen Reinigungsstufe	9
3.2 Übersicht über die Biologischen Verfahren zur Abwasserreinigung	10
3.3 Belebtschlammverfahren	11
3.4 Festbettverfahren	12
3.5 Wirbelbettverfahren	13
3.6 Membran-Belebtschlammverfahren	14
4. Grundsätze zur Datenauswertung	15
4.1 Belastung und Reinigungsleistung biologische Reinigungsstufe	15
4.2 Strommessungen	16
4.3 Spezifischer Stromverbrauch	16
5. Untersuchung Festbettanlage ARA Lyss	17
5.1 Beschreibung der Anlage	17
5.2 Belastung, Reinigungsleistung und Betrieb Festbettanlage	19
5.3 Messung Stromverbrauch	21
5.4 Stromverbrauch Festbettanlage	22
5.5 Einsparpotenzial Stromverbrauch Festbettanlage	23
6. Untersuchung Wirbelbettanlage ARA Wohlen	24
6.1 Beschreibung der Anlage	24
6.2 Belastung, Reinigungsleistung und Betrieb Wirbelbettanlage	25
6.3 Messung Stromverbrauch	27
6.4 Stromverbrauch Wirbelbettanlage	29
6.5 Einsparpotenzial Stromverbrauch Wirbelbettanlage	31

7. Untersuchung Membran-Belebtschlammverfahren ARA Wädenswil.....	32
7.1 Beschreibung der Anlage	32
7.2 Belastung, Reinigungsleistung und Betrieb Membran-Belebungsanlage	34
7.3 Messung Stromverbrauch.....	36
7.4 Stromverbrauch Membran-Belebtschlammverfahren.....	37
7.5 Einsparpotenzial Stromverbrauch Wirbelbettanlage	37
8. Vergleich Stromverbrauch der biologischen Reinigungsverfahren	38
8.1 Betriebliche Voraussetzungen	38
8.2 Spezifischer Stromverbrauch	40
9. Schlussfolgerungen.....	43
10. Stromverbrauchsentwicklung und Einsparpotenzial	43
11. Empfehlungen	44
11.1 Planung und Betrieb Kläranlage.....	44
11.2 Weitere Forschungsprojekte.....	44
Abkürzungsverzeichnis	45
Literaturverzeichnis	45
Anhang A.....	46
Anhang B.....	50
Anhang C.....	53

Zusammenfassung

Die biologische Reinigungsstufe ist der grösste Stromverbraucher von kommunalen Kläranlagen. Der Stromverbrauch von drei zukünftig vermehrt eingesetzten biologischen Reinigungsverfahren wurde am Beispiel der ARA Lyss (Festbettverfahren), ARA Wohlen (Wirbelbettverfahren) und ARA Wädenswil (Membran-Belebtschlammverfahren) untersucht und in Bezug zur Belastung gebracht. Das untersuchte Festbettverfahren weist mit 20 - 25 kWh/EW.a einen vergleichbaren spezifischen Stromverbrauch auf wie das konventionelle Belebtschlammverfahren (Richtwert = 23 kWh/EW.a; Idealwert = 18 kWh/EW.a). Der spezifische Stromverbrauch der Wirbelbettanlage betrug bei guter Auslastung der Anlage < 30 kWh/EW.a, bei schlechter Auslastung > 40 kWh/EW.a. Das Membran-Belebtschlammverfahren weist den grössten spezifischen Stromverbrauch auf (> 40 kWh/EW.a). Um eine biologische Reinigungsstufe bezüglich Stromverbrauch optimiert betreiben zu können, sollten die Anlagen derart konzipiert sein, dass sie während Zeiten schwacher Belastung automatisch partiell oder intermittierend betrieben werden können.

Bei zunehmender Anwendung dieser neuen biologischen Reinigungsverfahren wird der Stromverbrauch ansteigen. Dies muss nicht sein, denn Kläranlagen weisen bezüglich Stromverbrauch ein erhebliches Einsparpotential auf. Das Ausschöpfen dieses Potenzials setzt voraus, dass dem Stromverbrauch derselbe Stellenwert zukommt wie dem Einhalten der Qualität des gereinigten Abwassers.

Resumée

Dans les stations d'épuration des eaux usées et résiduaires municipales, la plupart de l'électricité est consommée durant le traitement biologique. La consommation d'électricité de trois procédés d'épuration biologique a été analysé, à la fois au niveau absolu ainsi que mis en rapport aux charges des stations, sur la base de trois exemples concrets, la STEP à Lyss (réacteur à lit fixe), la STEP à Wohlen (procédé par lit fluidisé) ainsi que la STEP à Wädenswil (système de membrane biologique incorporé dans un procédé par boues activées). Dans le cas présent, le procédé par lit fixe affiche une consommation d'électricité autour de 20 - 25 kWh/EH.a, ce qui est comparable à celle d'un procédé à boues activées classique (valeur indicative = 23 kWh/EH.a; valeur optimale = 18 kWh/EH.a). En cas de bonne utilisation de la capacité, la station à lit fluidisé atteint des valeurs spécifiques de consommation d'électricité inférieures à 30 kWh/EH.a; en cas de mauvaise utilisation de la capacité, les valeurs dépassent les 40 kWh/EH.a. La consommation spécifique d'énergie est la plus élevée dans le procédé à boues activées avec filtration sur membrane (> 40 kWh/EH.a). Afin de pouvoir optimiser la consommation d'électricité lors du traitement biologique, les stations devraient être conçues en sorte à se mettre automatiquement en mode partiel ou intermittent dès que la charge en résidus est basse.

Une implémentation plus fréquente de ces nouveaux procédés d'épuration biologiques engendra une augmentation de la consommation d'électricité, à moins que le potentiel important d'économie d'électricité qui existe auprès des stations d'épuration ne soit mis à profit. Afin de pouvoir réaliser ce potentiel, il est nécessaire d'accorder la même importance à la consommation d'électricité qu'à la qualité des eaux d'effluent traitées.

Abstract

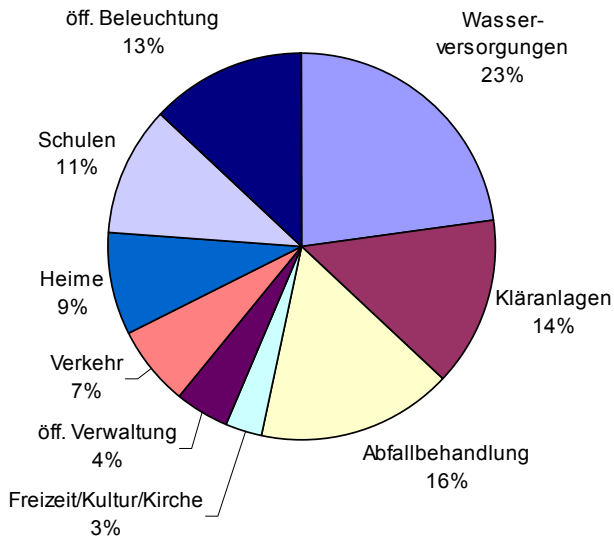
The highest electricity expenditure in municipal sewage treatment plants occurs during biological treatment. This fact has motivated a closer look at the electricity consumption of three biological treatment processes that will be applied more frequently in the future. The wastewater treatment plants in Lyss (Fixed Bed Biological Reactor), Wohlen (Moving Bed Biological Reactor), and Wädenswil (Membrane Biological Reactor submerged in an activated sludge process) provided the basis for this analysis, which was done both in absolute terms as well as in relation to each plant's load. The specific energy consumption of the Fixed Bed Reactor, averaging 20 - 25 kWh/p.e. .a, is comparable to the one of a conventional activated sludge process (benchmark/standard value = 23 kWh/ p.e. .a; optimal value = 18 kWh/ p.e. .a). The Moving Bed Reactor uses up less than 30 kWh/ p.e. .a when working at or close to full capacity, and more than 40 kWh/ p.e. .a at low fill. The Membrane Biological Reactor submerged in an activated sludge process shows the highest specific energy consumption values (> 40 kWh/ p.e. .a). In order to be able to run the biological treatment at optimal electricity consumption levels, the plants should be designed in such a way as to automatically run on partial or intermittent mode in times of low waste load.

Further implementation of these new biological purification processes will lead to an increase in electricity consumption unless the significant energy savings potential wastewater treatment plants still offer is tapped into. In order to be able to exploit this potential, electricity consumption must become as important as treated effluent quality.

1. Ausgangslage

Die rund 900 Kläranlagen in der Schweiz verbrauchten im Jahr 1994 ca. 300 GWh/a elektrische Energie (Handbuch, Energie in ARA [1]). Dies entspricht etwa dem Stromverbrauch der öffentlichen Beleuchtung von allen Gemeinden in der Schweiz (siehe Fig. 1). Der Anteil der biologischen Reinigungsstufe beträgt mehr als die Hälfte. Der Stromverbrauch auf Kläranlagen kann deshalb am wirkungsvollsten durch Massnahmen bei der biologischen Reinigungsstufe reduziert werden.

Im Rahmen der Erarbeitung der Schweizerischen Statistik erneuerbarer Energien [6] wurden für das Betriebsjahr 2001 Energiedaten von rund 65 % aller Kläranlagen der Schweiz erhoben und auf alle Kläranlagen der Schweiz hochgerechnet. Als Gesamtelektrizitätsverbrauch aller Kläranlagen wurden 432 GWh pro Jahr ermittelt.



Figur 1: Anteil des Stromverbrauches von Kläranlagen am Gesamtverbrauch von Gemeinden in der Schweiz. Quelle: Handbuch Energie in Wasserversorgungen [5]

2. Ziel der Arbeit

Kläranlagen bestehen in der Regel aus drei Hauptstufen:

1. Mechanische Stufe: Rechen, Sandfang, Absetzbecken
2. Chemische Stufe: Phosphatfällung durch Zugabe von Fällmittel
3. Biologische Stufe: Abbau der gelösten Abwasserinhaltsstoffe durch Mikroorganismen und Abscheidung der gebildeten Feststoffe

Der Hauptstromverbraucher der Kläranlagen ist die biologische Reinigungsstufe. Über den Stromverbrauch des gegenwärtig am meisten verbreiteten Belebtschlammverfahrens liegen gute Kenntnisse vor [2]. Hauptstromverbraucher der Belebtschlammanlage sind die Gebläse zur Belüftung des Abwassers.

Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Qualität des gereinigten Abwassers müssen die biologischen Reinigungsstufen vermehrt ausgebaut werden. Bei der Wahl des biologischen Reinigungsverfahrens spielte bisher die zur Verfügung stehende Fläche eine massgebende Rolle. Die Energiekosten wurden noch kaum berücksichtigt.

Über den Stromverbrauch von neueren biologischen Reinigungsverfahren liegen noch wenige Erkenntnisse und Vergleichswerte bzw. Empfehlungen zur Optimierung vor. Die vorliegende Studie „Untersuchung über den Stromverbrauch biologischer Reinigungsverfahren auf Kläranlagen“ will anhand von konkreten Messungen auf Kläranlagen Grundlagen erarbeiten, damit die verschiedenen biologischen Reinigungsstufen bezogen auf den Stromverbrauch bewertet und optimiert werden können. Damit ist eine weitere Voraussetzung geschaffen, Kläranlagen energetisch zu optimieren und den Gesamtenergieverbrauch der Kläranlagen im Vergleich zur Trendbeurteilung langfristig zu reduzieren.

Dieser Fachbericht zeigt eine Übersicht über die heute und in Zukunft relevanten biologischen Reinigungsverfahren und deren spezifischer elektrischer Energieverbrauch. Auf drei Abwasserreinigungsanlagen, deren biologische Reinigungsverfahren in Zukunft vermehrt zur Anwendung kommen dürften, wurde der Stromverbrauch detailliert untersucht. Bei den Anlagen handelt es sich um

- ARA Lyss: Festbettverfahren
- ARA Wohlen: Wirbelbettverfahren
- ARA Wädenswil: Membran-Belebtschlammverfahren

Diese Abwasserreinigungsverfahren werden im Detail beschrieben und deren Belastungen und Stromverbräuche dargestellt. Die Resultate werden in Relation zum konventionellen Belebtschlammverfahren gestellt. Als Einheit dient der spezifische Stromverbrauch pro Einwohnerwert.

Im Anschluss werden Ansatzpunkte für eine energetische Optimierung der Reinigungsverfahren dargestellt, sowie die Potenziale und Forschungslücken aufgezeigt.

3. Verfahren zur biologischen Behandlung von Abwasser

3.1 PROZESSE DER BIOLOGISCHEN REINIGUNGSSTUFE

In der biologischen Reinigungsstufe laufen mehrere chemische, biologische und physikalische Prozesse ab: Mikroorganismen wandeln gelöste Abwasserinhaltsstoffe um, vermehren sich dabei und bilden zusammen mit ungelösten Abwasserinhaltsstoffen Partikel, welche durch Sedimentation oder Filtration aus dem gereinigten Abwasser abgetrennt werden. Die gebildeten Feststoffe (Überschussschlamm) werden regelmässig aus der biologischen Reinigungsstufe entnommen und der Schlammbehandlung zugeführt.

In der biologischen Abwasserbehandlung dominieren in der Regel die aeroben Prozesse „Kohlenstoffabbau“ und „Nitrifikation“ (Tabelle 1). Organische Kohlenstoffverbindungen und Ammonium werden unter Anwesenheit von Sauerstoff in die anorganischen Endprodukte Wasser, Kohlendioxid und Nitrat umgewandelt. Der erforderliche Sauerstoff wird mittels Gebläsen ins Abwasser eingetragen.

Nitrat (Produkt der Nitrifikation) wird unter anoxischen Verhältnissen (Abwesenheit von Sauerstoff) in Luftstickstoff umgewandelt (Denitrifikation). Für den Abbauvorgang muss leicht verfügbarer Kohlenstoff vorhanden sein. Deshalb werden die Denitrifikationsbecken am Anfang der biologischen Reinigungsstufe angelegt. Da das Rohabwasser in der Regel kein Nitrat enthält, muss das nitrathaltige Abwasser, das bei der Nitrifikation am Ende der biologischen Reinigungsstufe freigesetzt wird, ins Denitrifikationsbecken rezirkuliert werden.

Prozess	biochemischer Vorgang	Bedingungen
Kohlenstoffabbau	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	aerob Abbau von Kohlenstoff unter Anwesenheit von Sauerstoff
Nitrifikation	$\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	aerob Umwandlung von Ammonium in Nitrat unter Anwesenheit von Sauerstoff
Denitrifikation	$4 \text{NO}_3^- + 5 \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{N}_2 + 4 \text{HCO}_3^- + 3 \text{H}_2\text{O}$	anoxisch Umwandlung von Nitrat in Luftstickstoff unter Anwesenheit von Nitrat und Ausschluss von Sauerstoff

Tabelle 1: Übersicht über die bedeutendsten biologischen Abbauprozesse der biol. Abwasserbehandlung

CH_2O Kohlenstoffverbindung

NH_4^+ Ammonium

H^+ Wasserstoff

CO_2 Kohlenstoffdioxid

O_2 Sauerstoff

N_2 elementarer Stickstoff

H_2O Wasser

NO_3^- Nitrat

HCO_3^- Bicarbonat

3.2 ÜBERSICHT ÜBER DIE BIOLOGISCHEN VERFAHREN ZUR ABWASSERREINIGUNG

Aufgrund unterschiedlicher technischer Randbedingungen wird bei der Abwasserreinigung zwischen den Verfahren mit suspendierter Biomasse (Belebungsverfahren) und den Verfahren mit festsitzender Biomasse unterschieden (Tabelle 2).

Das in der Schweiz am häufigsten angewendete Verfahren zur biologischen Abwasserbehandlung ist das Belebtschlammverfahren, bei dem die Biomasse (Mikroorganismen) durch die Belüftung zur Sauerstoffanreicherung in Suspension gehalten wird.

In den letzten Jahren wurden mehrere Festbettanlagen in Betrieb gesetzt, dies meist weil die vorhandenen Platzreserven keinen Ausbau der Belebtschlammanlagen erlaubten.

Bei den wenigen in Betrieb stehenden Wirbelbettanlagen handelt es sich meist um umgebaute Belebtschlammanlagen.

Das Membran-Belebungsverfahren ist ein neues Verfahren, welches dann angewendet wird, wenn bezüglich ungelösten Stoffen und Phosphor strenge Anforderungen an die Qualität des gereinigten Abwassers bestehen oder wenn das Platzangebot beschränkt ist.

Das SBR-Verfahren ist eine Variante des Belebtschlammverfahrens und wird in diesem Bericht nicht weiter untersucht. Das Tropfkörper-Verfahren (auch Tauch-Tropfkörper-Verfahren) ist vorwiegend bei kleineren Kläranlagen verbreitet und wird auch nicht näher behandelt.

Verfahren	Mikroorganismen	Feststoffabscheidung	Besonderheiten
Belebtschlammverfahren	suspendiert	Sedimentation in Nachklärbecken	<ul style="list-style-type: none">• grosser Platzbedarf• grosse Beckenvolumen• geringer hydraulischer Druckverlust
Festbettverfahren	festsitzend auf unbeweglichen Trägermaterialien	Filtration durch Trägermaterial, Spülung der filtrierten Stoffe	<ul style="list-style-type: none">• kleiner Platzbedarf• grosse Anzahl elektro-mechanischer Ausrüstungen• Trägerkörper im Abwasser eingetaucht• hydraulischer Druckverlust: ca. 0.3 bar
Wirbelbettverfahren	festsitzend auf beweglichen Trägermaterialien	Sedimentation in Nachklärbecken	<ul style="list-style-type: none">• grosser Platzbedarf• Trägerkörper in Bewegung• geringer hydraulischer Druckverlust
Membran-Belebungsverfahren	suspendiert	Filtration durch Membran	<ul style="list-style-type: none">• geringer Platzbedarf für Feststoffabscheidung• hohe Reinigungsleistung bezüglich ungelösten Stoffen und Phosphor• hydraulischer Druckverlust: ca. 0.4-2.0 bar
SBR-Verfahren (Sequence Batch Reactor)	suspendiert	Sedimentation in Belüftungsbecken	<ul style="list-style-type: none">• grosser Platzbedarf• intermittierende Beschickung von mehreren Biologiereaktoren in denen sämtliche Prozesse stattfinden.• hydraulischer Druckverlust: ca. 0.4 bar
Tropfkörper-Verfahren	festsitzend auf unbeweglichen Trägermaterialien	Sedimentation in Nachklärbecken	<ul style="list-style-type: none">• geringer Platzbedarf• Abwasser rieselt über Trägerkörper• hydraulischer Druckverlust: 0.4-2.0 bar

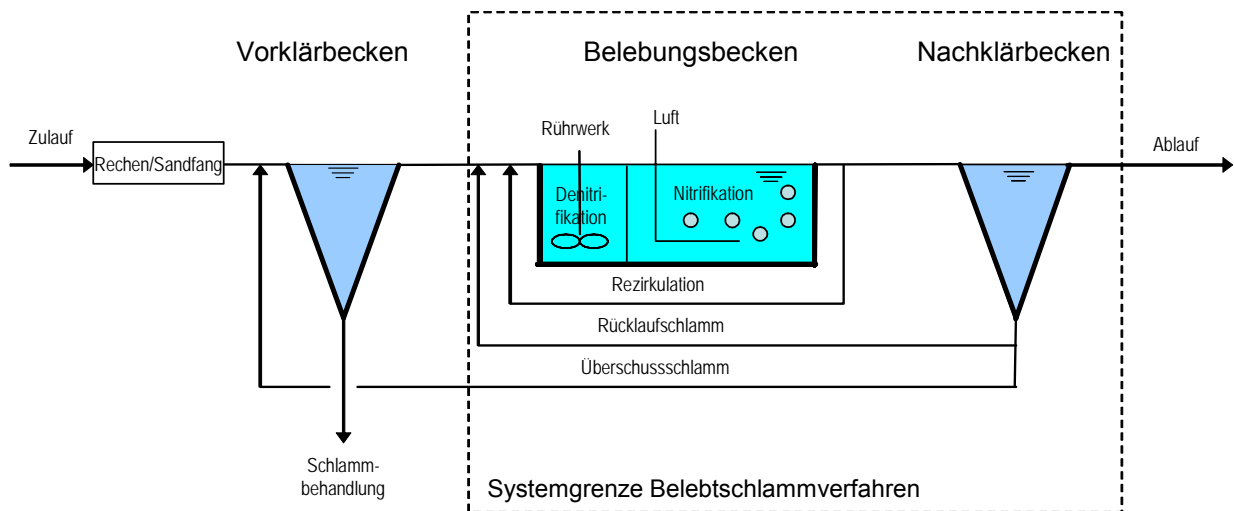
Tabelle 2: Übersicht über die Verfahren der biologischen Abwasserbehandlung

3.3 BELEBTSCHLAMMVERFAHREN

Im Belebtschlammverfahren (siehe Fig. 2) wird der Schlamm im aeroben Bereich des Belebungsbeckens durch Einblasen von Luft in Suspension gehalten. Dadurch wird auch der für den Abbauprozess notwendige Sauerstoff eingetragen. Im vorgeschalteten Denitrifikationsbecken sorgen Rührwerke für die optimale Mischung des Belebtschlammes mit dem zufließenden Abwasser und dem rezyklierten Abwasserteilstrom aus dem aeroben Reaktor.

Der Schlamm setzt sich im nachfolgenden Nachklärbecken durch Sedimentation auf den Grund des Beckens. Um den Schlammgehalt im Belebungsbecken zu halten muss ein Teil des Schlammes vom Nachklärbecken in das Belebungsbecken zurückgeführt werden (Rücklaufschlamm). Der gebildete Überschussschlamm wird meist im Vorklärbecken, zusammen mit dem Primärschlamm des Rohabwassers abgesetzt und der Schlammbehandlung zugeführt.

Die Belebungsbecken werden mit einem Schlammgehalt von ca. 3 kg TS/m^3 betrieben. Höhere Schlammgehalte hätten ein grösseres Gesamtschlammbettvolumen (Belebungsbecken und Nachklärbecken) zur Folge. Um den Prozess Nitrifikation ganzjährig gewährleisten zu können, ist ein Schlammalter (Aufenthaltszeit des Belebtschlammes im aeroben Teil des Belebungsbeckens) von ca. 10 Tagen erforderlich.



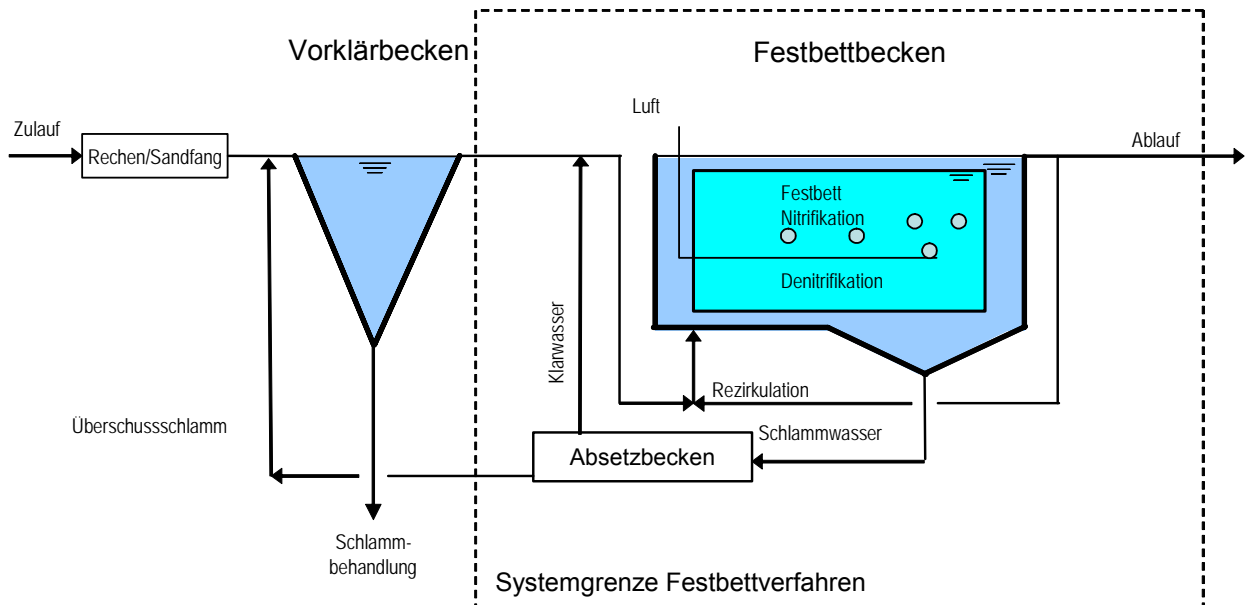
Figur 2: Schema einer konventionellen Belebtschlammanlage

Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren können sowohl kontinuierlich d.h. im Durchlaufbetrieb, als auch diskontinuierlich betrieben werden. Bei der klassischen Konfiguration des Durchlaufbetriebs folgt auf ein Belebungsbecken zur Belüftung des Gemisches aus Abwasser und Belebtschlamm ein Nachklärbecken zur Schlammabtrennung. Beim diskontinuierlichen oder Batch-Betrieb laufen die einzelnen Phasen des Belebungsverfahrens (Befüllung, Belüftung, Abtrennung, Entleerung) in nur einem Becken zeitlich nacheinander ab.

3.4 FESTBETTVERFAHREN

Im Festbettverfahren durchströmt das Abwasser das inerte Trägermaterial in einer definierten Zone eines Reaktors (siehe Fig. 3). Die sich auf der Oberfläche des Trägermaterials bildende Biomasse wird periodisch mit einer Spülung (mit Luft und Wasser) ausgewaschen. Die im Schlammwasser enthaltenen Feststoffe werden meist in einem Lamellenklärer abgeschieden und dann der Schlammbehandlung zugeführt. Das Klarwasser wird in den Zulauf zum Festbett zurückgeführt.

Bezüglich Reaktorkonfiguration, Abwasserdurchströmung und eingesetzten Trägermaterialien werden mehrere Verfahren auf dem Markt angeboten. Es gibt aufwärts- und abwärts durchströmte Reaktoren. Bei einigen Verfahren erfolgt der Kohlenstoffabbau/Denitrifikation und die Nitrifikation in separaten Reaktoren mit unterschiedlichen Trägermaterialien. Bei anderen Verfahren erfolgen die genannten Prozesse in einem Reaktor, welcher in eine unbelüftete und belüftete Zone unterteilt ist. Als Trägermaterial sind mehrere Systeme im Einsatz: waben- oder zylinderförmige Gitterkörper, Blähton- und Styroporkügelchen. Eine Festbettanlage besteht aus mehreren parallel betriebenen Reaktoren. Dies erlaubt es, in Zeiten schwacher Belastung (Nacht, saisonale Schwankungen) einzelne Reaktoren zwecks Energieeinsparung vorübergehend auf Stand-by zu schalten. Die Aufenthaltszeit des Abwassers im Festbettreaktor ist wegen der geringen Volumen deutlich kleiner als bei einer Belebtschlamm-anlage.

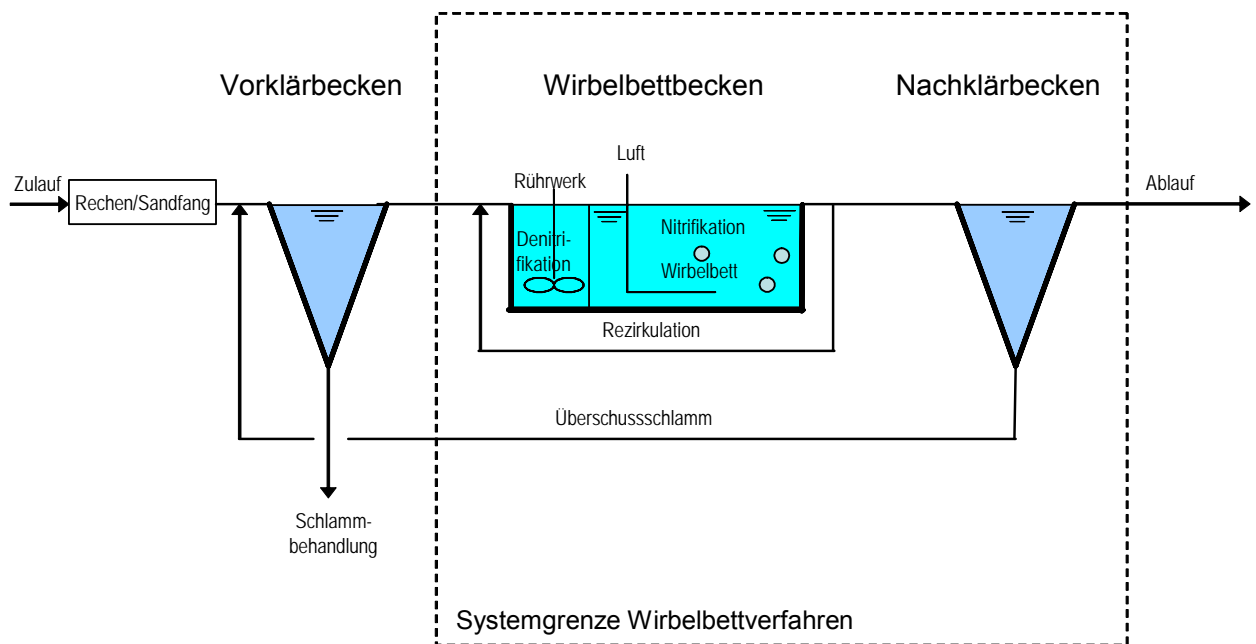


Figur 3: Schema einer Festbettanlage

3.5 WIRBELBETTVERFAHREN

Das Wirbelbettverfahren (siehe Fig. 4) ähnelt dem Belebungsverfahren. Es unterscheidet sich darin, dass die Biomasse nicht in Suspension gehalten wird, sondern auf einem inerten Trägermaterial, das sich frei im Abwasser bewegen kann, wächst. Durch die Bewegung des Trägermaterials, die durch eine grobblasige Belüftung hervorgerufen wird, findet ein permanenter Abtrag der Biomasse an den Trägerkörpern statt. Diese wird mit dem Abwasser aus dem Wirbelbett ausgetragen und setzt sich im Nachklärbecken ab. Die Belüftung sorgt im Nitrifikationsbecken gleichzeitig für den Sauerstoffeintrag. Im Denitrifikationsbecken werden die Trägerkörper mit Rührwerken in Bewegung gehalten.

Die Trägerbiologie ist unterteilt in einen Denitrifikations- und einen Nitrifikationsreaktor. Das Nitrifikationsbecken kann durch Trennwände – die zwar die Träger zurückhalten, nicht aber das Abwasser – in verschiedene nacheinander geschaltete Reaktoren unterteilt werden. Damit kann erreicht werden, dass sich in den verschiedenen Reaktoren verschiedene Bakterienkulturen ansiedeln. Dies kann bei Industrieabwasser von grossem Interesse sein.



Figur 4: Schema einer Wirbelbettanlage

Der Überschussschlamm wird üblicherweise im Vorklärbecken mit dem Primärschlamm des Rohabwassers sedimentiert und der Schlammbehandlung zugeführt. Zwischen Wirbelbettreaktor und Absetzbecken wird idealerweise ein Fällungsbecken geschaltet, in welchem Metallsalze zur Fällung des Phosphors dosiert werden.

Das Wirbelbettverfahren kommt ohne Rücklaufschlamm aus. Es müssen also nur der Überschussschlamm und der Fällungsschlamm sedimentiert werden. Aus diesem Grund können Absetzbecken höher belastet werden als Nachklärbecken bei Belebungsanlagen.

Bei Ausbauten von Belebungsanlagen kann durch den Einsatz von Wirbelbettverfahren sowohl die biologische wie auch die hydraulische Leistung erhöht werden.

3.6 MEMBRAN-BELEBTSCHLAMMVERFAHREN

Das Membran-Belebtschlammverfahren ist ein Belebtschlammverfahren, bei dem die Feststoffabscheidung durch eine Membran statt durch eine Sedimentation erfolgt (siehe Fig. 5). Die Membran kann entweder im biologischen Reaktor oder in einem nachfolgenden Becken angeordnet werden.

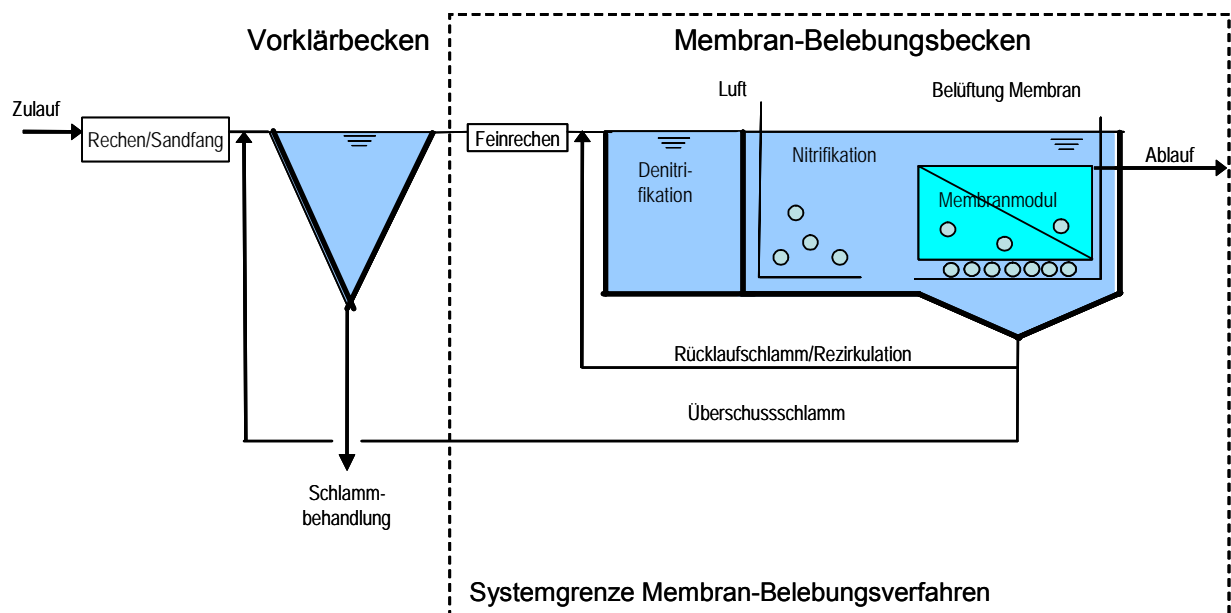
Durch den Einsatz der Membran als Feststoffabscheideverfahren kann der Schlammgehalt im Belebungsbecken auf 9-12 kg TS/m³ erhöht werden. Mit dieser Massnahme wird das Schlammalter gegenüber dem konventionellen Belebtschlammverfahren auf das 3-4-fache erhöht.

Je nach verwendetem Modulsystem wird zwischen internen, d.h. in Belebungsbecken eingetauchten Membranmodulen und externen Membranstufen, d.h. separat aufgestellten Membranmodulen ausserhalb von Becken, unterschieden. In der kommunalen Abwasserreinigung werden aus Kostengründen ausschliesslich getauchte Membranmodule verwendet.

Die Feststoffabscheidung der Membranstufe ist nahezu vollständig. Daher bietet sich der Einsatz einer Membranstufe in der kommunalen Abwasserreinigung vor allem an, wenn bezüglich ungelöster Stoffe und Phosphorelimination erhöhte Anforderungen an die Einleitung des gereinigten Abwassers gestellt werden (z.B. im Einzugsgebiet von Seen).

Der mechanischen Reinigung des zufließenden Abwassers kommt beim Membran-Belebungsverfahren eine besondere Bedeutung zu. Bestimmte Typen von Membranmodulen neigen zu Verzopfungen und infolgedessen zu Verschlammungen. Daraus resultiert eine unzureichende Membranüberströmung, die wiederum zu geringeren Filtrationsleistungen führt. Daher ist das Rohwasser deutlich sorgfältiger von Störstoffen wie Fetten, Haaren oder sonstigen Grobstoffen zu befreien (z.B. Feinrechen), als dies bei konventionellen Belebungsanlagen erforderlich ist.

Bei den meisten Verfahren wird das gereinigte Abwasser durch Saugpumpen (Permeatpumpen) durch die Membranen gefördert. Für den Erhalt der Filtrationsleistung ist regelmässig eine Reinigung der Membranmodule durchzuführen. Die Leistungsabnahme ist auf eine Erhöhung des Filtrationswiderstandes durch organische und anorganische Deckschichtbildungen auf den Membranflächen bzw. die Verblockung von Membranporen zurückzuführen, die sich durch betriebliche Massnahmen wie Überströmung und Rückspülung der Membranflächen nicht vermeiden lassen.



Figur 5: Schema einer Membran-Belebtschlammanlage (integrierte Anordnung der Membranstufe)

4. Grundsätze zur Datenauswertung

Sämtliche erhobenen Betriebsdaten werden als mittlere Tageswerte pro Monat dargestellt.

4.1 BELASTUNG UND REINIGUNGSLEISTUNG BIOLOGISCHE REINIGUNGSSTUFE

Für die Beurteilung der Belastung der biologischen Reinigungsstufen wurden folgende Messgrößen ausgewertet:

- Abwassermenge
- BSB₅ Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
- CSB Chemischer Sauerstoffbedarf
- NH₄-N Ammonium-Stickstoff
- N_{tot} Gesamtstickstoff, falls vorhanden
- NO₃-N Nitrat-Stickstoff, falls vorhanden

In der Regel konnte auf die periodischen Analysen im vorgeklärten Abwasser (= Zulauf Biologie) der Anlagenbetreiber zurückgegriffen werden. In wenigen Fällen waren Ergänzungsmessungen erforderlich. Das stark stickstoffhaltige Faulwasser aus dem Rücklauf der Schlammbehandlung wurde mitberücksichtigt.

Als Mass für die Belastung wurden die Schmutzstofffrachten im Zulauf zur Biologie in Einwohnerwerte umgerechnet. Die Umrechnungsfaktoren wurden in Anlehnung an die Annahmen im Handbuch Energie in Kläranlagen, NRW, 1999 [2] gewählt, damit die Vergleichbarkeit gegeben ist (siehe Tab. 3). Die Werte stimmen mittlerweile mit den vom VSA (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) verwendeten Werten überein. Im schweizerischen Handbuch Energie in ARA [1] wurden leicht abweichende Umrechnungsfaktoren verwendet (Ablauf Vorklärung: 50 g BSB₅ / EW d).

Parameter	vorgeklärtes Abwasser Zulauf Biologie	Rohabwasser (Handbuch Energie in Kläranlagen [2])
CSB	80 g CSB / EW d	120 g CSB / EW d
BSB ₅	40 g BSB ₅ / EW d	60 g BSB ₅ / EW d
N _{Kjel} = N _{org} + NH ₄ -N	10 g N _{Kjel} / EW d	11 g N _{Kjel} / EW d
NH ₄ -N	7.5 g NH ₄ -N / EW d	

Tabelle 3: Definition der Einwohnerwerte

Mit Ausnahme der ARA Lyss liegen für die Gesamtstickstoffbelastung (N_{tot}) keine Daten vor. Für die ARA Wohlen wurden folgenden Annahmen getroffen:

vorgeklärtes Abwasser: $N_{\text{tot}} = 1.33 \cdot \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ {1}
Faulwasser: $N_{\text{tot}} = 1.2 \cdot \text{NH}_4\text{-N}$ {2}

Die Reinigungsleistung der Kläranlagen (Qualität des gereinigten Abwassers, Schmutzstoffeliminationsgrad) wurde aufgrund der vorgegebenen Einleitbedingungen beurteilt.

Für die Berechnung der Gesamtstickstoffelimination der Biologie wurde der Gesamtstickstoff im Ablauf der Biologie folgendermassen berechnet:

gereinigtes Abwasser: $N_{\text{tot}} = \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ {3}

4.2 STROMMESSUNGEN

Das Untersuchungsprogramm, bewertet nur den Stromverbrauch jener Aggregate, die unmittelbar für die biologische Reinigungsstufe eingesetzt werden. Hebewerke, die das vorgeklärte Abwasser aufgrund der ungünstigen Topographie in die biologische Reinigungsstufe heben, werden nicht in die Betrachtung einbezogen, da sie mit dem biologischen Verfahren direkt nichts zu tun haben. Die Rezirkulationspumpen werden in die Betrachtung einbezogen wie auch die Permeatpumpen bei Membran-Belebungsverfahren.

Der Stromverbrauch der entsprechenden Aggregate wurde während mehrerer Monate beobachtet. Die Messungen erfolgten mit den in den Anlagen installierten Messgeräten.

Von den Ausnahmen abgesehen, in denen auf die Zählerstände separater Stromzähler zurückgegriffen werden konnte, wurde der Stromverbrauch überschlägig ermittelt. Im Falle der auf Kläranlagen üblichen Drehstrommotoren geschah dies anhand der Gleichungen {4} und {5}. In einzelnen Fällen wurden Messgeräte für diese Studie neu installiert.

$$\text{Leistungsaufnahme [kW]} = \text{Spannung [V]} \times \text{Stromaufnahme [A]} \times \sqrt{3} [-] \times \cos\varphi [-] \quad \{4\}$$

$$\text{Stromverbrauch [kWh/d]} = \text{Spannung [V]} \times \text{Stromaufn. [A]} \times \sqrt{3} [-] \times \cos\varphi [-] \times \text{Betriebsstunden [h/d]} \quad \{5\}$$

Spannung	[V]	380 - 400
Stromaufnahme	[A]	durchschnittliche Stromstärke, abgelesen (stichprobenweise) am zugehörigen Ampèremeter
cosφ	[-]	Leistungsfaktor gemäss Herstellerangaben (zwischen 0.65 und 0.9)
Betriebsstunden	[h]	Zahl der Betriebsstunden (wöchentliche Ablesung durch die Betriebsleitung)

4.3 SPEZIFISCHER STROMVERBRAUCH

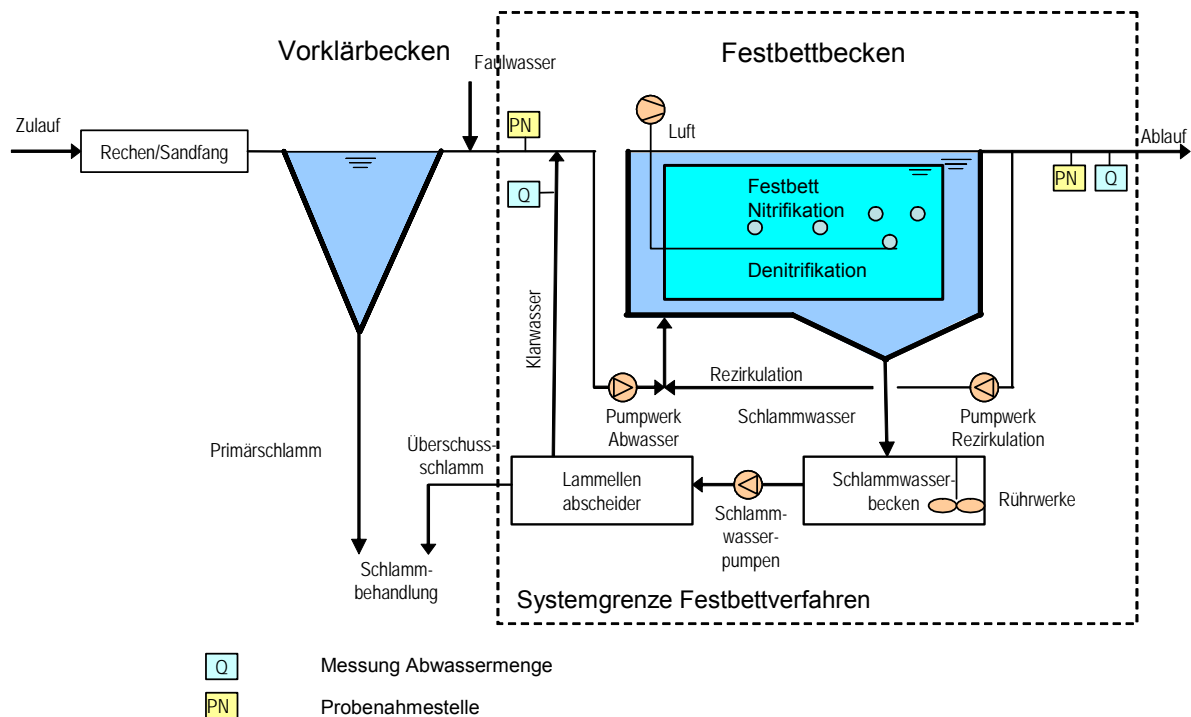
Die Berechnung des spezifischen Stromverbrauchs bezogen auf die Belastung erfolgt gemäss Formel {6}.

$$\text{spez. Stromverbrauch [kWh/EW}_{\text{BSB}_5/\text{CSB}} \cdot \text{a]} = \text{Stromverbrauch [kWh/a]} / \text{Einwohnerwerte [EW}_{\text{BSB}_5/\text{CSB}}] \quad \{6\}$$

Als Bezugsgrösse wird der Einwohnerwert Kohlenstoff [EW_{BSB5/CSB}] herangezogen. Er wird aus dem Mittelwert der Einwohnerwerte CSB [EW_{CSB}] und BSB₅ [EW_{BSB5}] berechnet, sofern sowohl BSB₅- wie auch CSB-Werte vorliegen.

5. Untersuchung Festbettanlage ARA Lyss

5.1 BESCHREIBUNG DER ANLAGE



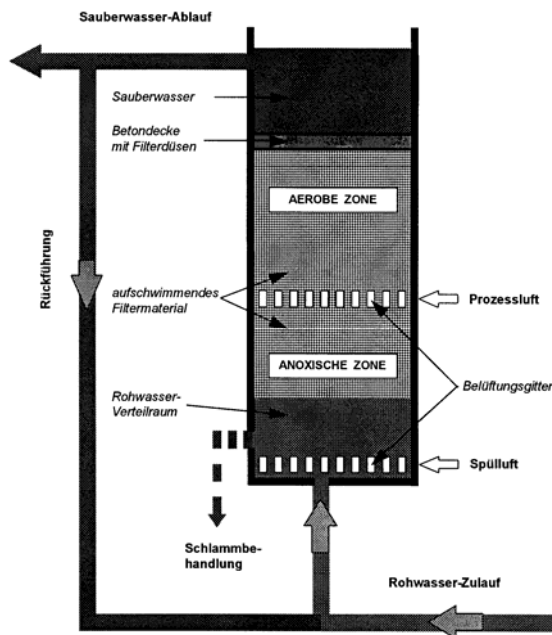
Figur 6: Schema der ARA Lyss

Die Festbettanlage der ARA Lyss mit einer Ausbaugrösse von 106'000 EW_{CSB} (siehe Fig. 6) umfasst neun Zellen (siehe Fig. 8), wovon acht im Erstausbau ausgerüstet und in Betrieb gesetzt wurden. Sie beansprucht eine gesamte Fläche von ca. 30 m x 50 m inkl. Maschinenhaus. Die einzelnen Filterzellen weisen Abmessungen von 8.2 m x 10.3 m mit einem Filtereinbau von 3 m auf. Die Festbettanlage wurde im Frühling 2002 und die Schlammwasserbehandlungsanlagen im Frühling 2003 in Betrieb genommen.

Das in der mechanischen Reinigungsstufe (Rechen, Sandfang, Vorklärbecken) behandelte Abwasser gelangt über ein Pumpwerk (4 Tauchmotorpumpen) in den Zulaufsee, von dem das Abwasser gleichmässig auf die in Betrieb stehenden Festbettreaktoren verteilt wird. Das Abwasser durchströmt eine 3 m hohe Packung von Styroporkügelchen (2 - 4 mm Durchmesser) von unten nach oben. Die Styroporkugeln (siehe Fig. 9) sind das Trägermaterial für die Mikroorganismen und werden unterhalb des Düsenbodens unter Wasser gehalten.

Der untere Teil (Höhe 1 m) des Trägermaterials wird nicht belüftet (siehe Fig. 7). In dieser anoxischen Zone erfolgt die Denitrifikation. Der obere Teil des Trägermaterials wird mittels eines sich innerhalb der Packung befindlichen Belüftungsgitters belüftet. In dieser aeroben Zone erfolgen die Nitrifikation und der aerobe Kohlenstoffabbau. Die anoxische Zone wird durch Rezirkulation eines Teilstroms gereinigten Abwassers in den Zulaufsee mit Nitrat versorgt.

Die Erzeugung der Druckluft erfolgt mit drehzahlgeregelten Drehkolbengebläsen. Jeder Biofilterzelle ist ein separates Gebläse mit separater Druckluftspeiseleitung zugeordnet. Die Steuerung der Gebläse erfolgt in Abhängigkeit der Ammoniumfracht im Zulauf der Festbettanlage. Wenn sowohl die Abwassermenge wie auch die Ammoniumfracht gering sind, wird eine Festbettzelle nach der andern automatisch abgeschaltet. Zur Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit der Mikroorganismen werden die abgeschalteten Festbettreaktoren periodisch während kurzer Zeit belüftet. Bei steigender Belastung (Abwassermenge und Ammoniumfracht) werden die Standby-Festbettzellen wieder zugeschaltet.



Figur 7: Funktionsschema Festbett System Biostyr

Durch den biologischen Abbau wächst auf dem Trägermaterial neue Biomasse auf. Zusätzlich gelangen Feststoffe mit dem vorgeklärten Abwasser und dem Klarwasser des Lamellenabscheiders auf die Festbettanlage. Dies führt dazu, dass der Filterwiderstand der Festbettpackung stetig anwächst. Sobald der maximale Filterwiderstand erreicht ist, oder nach Ablauf einer wählbaren Betriebszeit (in der Regel 24 Stunden), wird eine Spülung des Trägermaterials ausgelöst. Beim Spülprozess werden die Styroporkugeln mit Luft stark bewegt, um die Feststoffe abzulösen. Diese werden anschliessend mit dem Wasser der Festbettzelle ins Schlammwasserbecken geleitet.

Die Schlammwasserpumpen fördern das Schlammwasser in den Lamellenabscheider, wo die Feststoffe abgeschieden werden. Der abgesetzte Überschussschlamm wird der Schlammbehandlung (Entwässerung, Faulung) zugeführt und das Klarwasser in den Zulauf zur Festbettanlage geleitet. Zur Verhinderung von Ablagerungen und Bildung von Schwimmschlamm sind im Schlammwasserbecken (Volumen: 970 m³) zwei Tauchmotor-Propellerrührwerke installiert. Diese sind gleichzeitig mit den Schlammwasserpumpen in Betrieb.



Figur 8: Festbettzellen



Figur 9: Trägerkörper (2-4 mm)

5.2 BELASTUNG, REINIGUNGSLEISTUNG UND BETRIEB FESTBETTANLAGE

Die Festbettanlage der ARA Lyss wurde auf 106'000 Einwohnergleichwerte CSB ausgelegt (siehe Tab. 4). Ein bedeutender Anteil des Abwassers der ARA Lyss stammt aus Industriebetrieben. Rund 40% der Schmutzstofffracht werden von zwei Grosseinleitern geliefert.

Die Festbettanlage wurde in der Untersuchungsperiode (Januar 2005 – Oktober 2006) recht gleichmässig belastet (siehe Anhang A1, A2, A6). Es ist kein ausgeprägter Jahresgang in der Belastung auszumachen. Im März 2006 sind GUS- (gesamte ungelöste Stoffe) und CSB-Frachtspitzen aufgetreten. Gründe für diese ausserordentliche Belastung waren einerseits starke Niederschläge, welche die Ablagerungen im Kanalnetz abschwemmten, und andererseits Störungen in der Abwasservorbehandlungsanlage eines Grosseinleiters. Die Schmutzfrachten CSB und BSB₅ lagen nahe bei den Auslegungsgrössen. Die Stickstoffbelastung (Gesamtstickstoff, Ammonium) lag hingegen häufig über den Auslegungsfrachten. Da die Anzahl der in Betrieb stehenden Festbettzellen durch die Ammoniumbelastung bestimmt wird, waren meistens alle Festbettzellen in Betrieb.

Parameter	Auslegung 80%-Werte		Belastung Jan 2005 - Okt 2006 Mittelwerte 80%-Werte		Auslastung 80%-Werte
Abwassermenge	26'250 m ³ /d		17'534 m ³ /d	23'500 m ³ /d	89 %
CSB	8'500 kg/d	106'000 EW	5'325 kg/d	6'646 kg/d	78 %
BSB ₅	4'250 kg/d	106'000 EW	2'838 kg/d	3'637 kg/d	85 %
NH ₄ -N (Ammonium)	680 kg/d	90'700 EW	605 kg/d	737 kg/d	108 %
N _{tot}	935 kg/d	93'500 EW	912 kg/d	1'105 kg/d	118 %

Tabelle 4: Auslegung und Belastung Festbettanlage Lyss

Trotz hoher Belastung und zeitweiser Überlastung (Stickstoff) kann die Reinigungsleistung des Festbettes und die Qualität des gereinigten Abwassers als gut bezeichnet werden. Im Normalbetrieb konnten die Einleitbedingungen (siehe Tab. 5) eingehalten werden. Erhöhte Ablaufkonzentrationen traten bei Betriebsstörungen auf der Kläranlage oder bei den Vorbehandlungsanlagen der Grosseinleiter ein:

- Im März 2005 und Januar - März 2006 gab es zeitweise Probleme mit Schlammabtrieb aus der Festbettanlage mit entsprechend erhöhten GUS-Werten (und damit verbunden CSB- und BSB₅-Werte). Ursachen für diese Phänomene konnten nicht gefunden werden. Sie dürften jedoch in der zeitweise stark schwankenden Zusammensetzung des Abwassers liegen. In diesen Zeitperioden funktionierten sowohl der Kohlenstoffabbau wie auch die Nitrifikation gut.
- In der Periode Juni - Juli 2006 wurden zwei Festbettreaktoren plötzlich sehr ungleichmässig belüftet. Dies führte zu erhöhten Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Festbettanlage. Eine Inspektion der Festbettzellen nach aufwändigen Vorarbeiten brachte Defekte bei den Luftverteilungsleitungen zutage.

Der Betrieb der Festbettanlage war stark geprägt von der Standzeit der Reaktoren (Zeitdauer zwischen zwei Spülungen), welche vom Filterwiderstand des Trägermaterials bestimmt wird. Normalerweise beträgt die Standzeit 20-24 Stunden. Wenn die hydraulische Belastung zunimmt, oder wenn die Schmutzfrachten der Grosseinleiter wegen Störungen in den betriebseigenen Vorbehandlungsanlagen zunehmen, so neigen die Festbettreaktoren zu einer raschen Verstopfung. Die Standzeit fiel zeitweise auf Werte von 10-15 Stunden. In diesen Zeiten bildeten die Schlammwasserbehandlungsanlagen den Engpass der Festbettanlage. Da die Festbettanlage bei der starken Auslastung über keine freien Kapazitäten verfügte, wäre die Ablaufqualität des gereinigten Abwassers stark beeinträchtigt worden, falls mehrere Festbettreaktoren auf die Spülung hätten warten müssen. Das Betriebspersonal musste deshalb während den „Verstopfungsphasen“ (Mai - Juni 2005, April - Mai 2006) die Belüftung auf das untere Belüftungsgitter umstellen. Mit dieser Massnahme konnten die Standzeiten deutlich erhöht und die Reinigungsleistung sichergestellt werden. Diese Massnahme verursachte einen bedeutend höheren Stromverbrauch, sowie eine Reduktion der Gesamtstickstoffelimination.

Parameter		Abflusskonzentrationen			Abbauleistung Im Jahresmittel bezogen auf Rohabwasser [%]
		90%-Wert [mg/l]	Höchstwert [mg/l]	Jahresmittel [mg/l]	
Gesamte ungelöste Stoffe	GUS	15	30		
Biochemischer Sauerstoffbedarf	BSB ₅	15	30		90
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	50	90		85
Gelöster organischer Kohlenstoff	DOC	10	15		85 bezogen auf TOC
Ammonium	NH ₄ -N	2	4		90 bezogen auf N _{Kjel}
N-Elimination	N _{tot}				55
Gesamtphosphor	P _{tot}			0.8	80

Erläuterungen zu Grenzwerten:

90%-Wert: Dieser Wert darf höchstens in 10% aller 24-Stunden-Mischproben überschritten werden.

Höchstwert: Dieser Wert muss in der 24-Stunden-Mischprobe immer unterschritten werden.

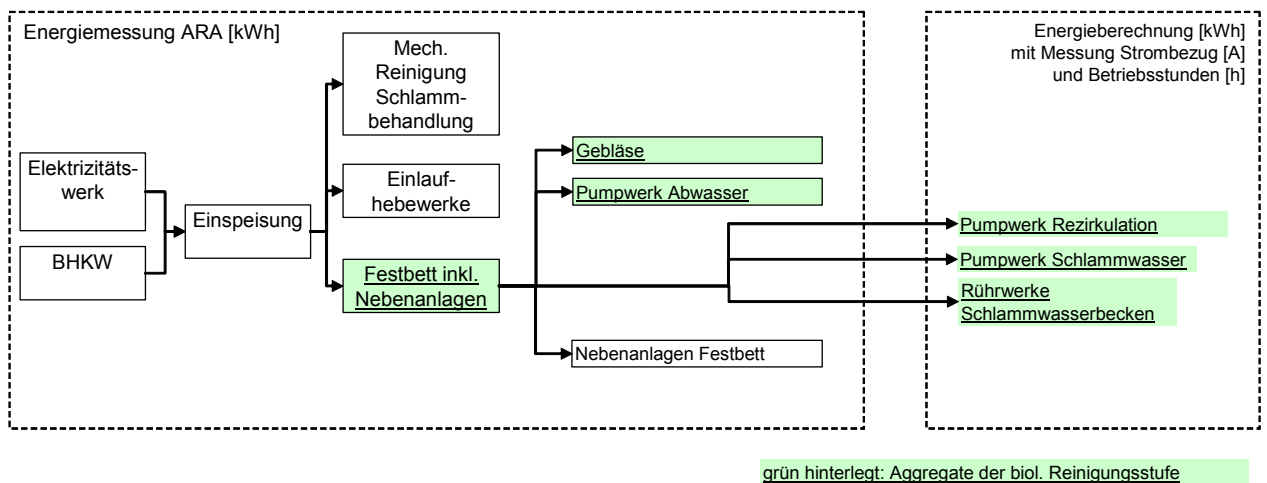
CSB: Keine Grenzwerte, sondern Richtwerte.

Tabelle 5: Anforderungen an die Reinigungsleistung (Einleitbedingungen) ARA Lyss

Die mittlere Gesamtstickstoffelimination der Festbetтанlage in der Untersuchungsperiode betrug 66% (siehe Anhang A3). Die Stickstoffelimination sank dann, wenn aufgrund des hohen Abwasseranfalles die Rezirkulation reduziert wurde, oder wenn aufgrund von Verstopfungen der Festbettzellen die Reaktoren über die unteren Spülluftgitter belüftet und somit die Denitrifikationszonen aufgegeben werden musste. Auch in diesen Betriebszeiten war jedoch die Stickstoffelimination erstaunlich hoch. Offenbar findet die Denitrifikation nicht nur im „Denitrifikationsteil“ des Festbettes, sondern teilweise auch im „Nitrifikationsteil“ statt.

Im 1. Halbjahr 2005 wurden vom Lieferanten des Festbettes verschiedene Optimierungsmassnahmen ergriffen, welche auch die Reduktion des Stromverbrauches zum Ziel hatten. Die Rezirkulationsmenge wurde ab Juni 2005 deutlich reduziert und die Gebläse zur Belüftung der Festbettreaktoren wurden im Verhältnis zur Ammoniumbelastung schrittweise zurückgefahren.

5.3 MESSUNG STROMVERBRAUCH



Figur 10: Erfassung des Stromverbrauchs der ARA Lyss

In der ARA Lyss werden die Stromdaten gemäss Figur 10 erfasst. Da die Bilanz der Hauptverteilung von Strombezug, Stromproduktion (BHKW) und den Hauptverbrauchern aufgeht, wird davon ausgegangen, dass die Erfassung des „Stromverbrauchs Festbett inkl. Nebenanlagen“ korrekt ist. Von einigen Aggregaten wird der Stromverbrauch nicht separat erfasst. Der Stromverbrauch des Pumpwerkes Schlammwasser und der Rührwerke Schlammwasserbecken wurden gemäss Formel {5} berechnet.

Eine Plausibilitätsüberprüfung des Stromverbrauchs der einzelnen Aggregate der Festbettanlage hat ergeben, dass die Stromverbrauchserfassungen „Gebläse“, „Pumpwerk Abwasser“ und „Nebenanlagen Festbett“ fehlerhaft waren. Die Fehler wurden im Verlaufe der Monate Mai – Juni 2006 behoben (siehe Tab. 6). Auch nach erfolgter Korrektur der Stromverbrauchserfassung verblieb zwischen dem Gesamtstromverbrauch Festbett (Messung) und der Summe aller Verbraucher (Messung, Rechnung) ein Bilanzfehler von 10%. Dieser wurde durch Korrektur des Stromverbrauches Gebläse ausgeglichen.

Messung	Korrektur	Bemerkungen
Nebenanlagen Festbett	Gemessene Werte mit Faktor 1.45 multipliziert	
Pumpwerk Abwasser	Stromverbrauch [kWh/d] = $0.048 \times Q \text{ [m}^3/\text{d]}$	Korrekturfaktor aufgrund der korrekten Messungen ab Juli 2006
Gebläse	Differenzrechnung: Stromverbrauch „Festbett inkl. Nebenanlagen“ abzüglich aller anderen Stromverbraucher	<ul style="list-style-type: none"> • Periode Jan 05 – Juni 06: die gemessenen Werte wurden um rund 30 % reduziert • Ab Juli 06: Werte wurden um ca. 10 % erhöht, damit Strombilanz aufgeht.

Tabelle 6: Übersicht Korrekturen Strommessungen ARA Lyss

5.4 STROMVERBRAUCH FESTBETTANLAGE

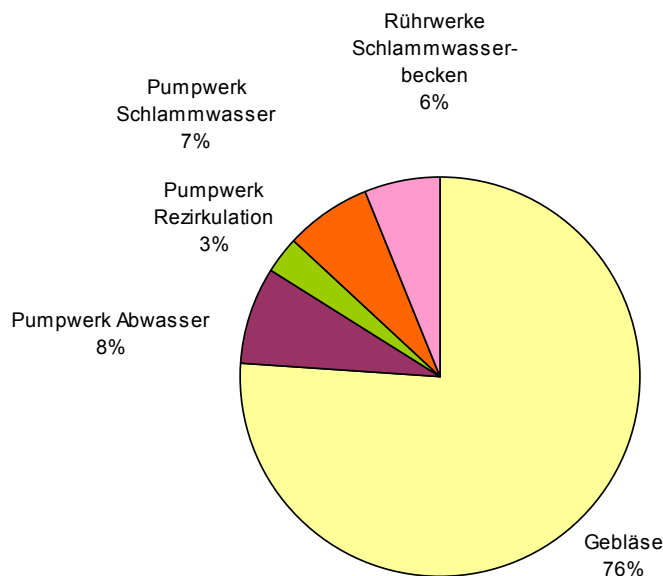
Anhang A4 zeigt den Verlauf der unkorrigierten Stromverbrauchsmessungen der Festbettanlage als Monatsmittelwerte. Der Stromverbrauch „Rest“ (Pumpwerk Rezirkulation, Pumpwerk Schlammwasser, Rührwerke Schlammwasserbecken) war bisweilen negativ, ein deutlicher Hinweis, dass die Stromverbrauchsmessungen unkorrekt waren.

In Anhang A5 sind gemäss Tabelle 6 die korrigierten Werte der einzelnen Stromverbraucher dargestellt. Der Stromverbrauch für die Förderung des Abwassers (inkl. Klarwassers) auf die Festbettanlage wurde dabei nur zu einem Drittel berücksichtigt. Aufgrund des hohen Grundwasserspiegels musste die Festbettanlage in die Höhe gebaut werden, was zu einer Förderhöhe von 9 m (statt dem hydraulischen Verlust von ca. 3 m der eigentlichen Festbettanlage) für das Abwasserpumpwerk führte.

Es fällt auf, dass die Festbettanlage in den Monaten April - Juni 2005, im April/Mai 2006 und Oktober 2006 ein deutlich höherer Stromverbrauch aufwies. Diese Stromverbrauchsspitzen fallen zusammen mit den „Verstopfungsperioden Festbett“ während der die Belüftung des Festbettes im Interesse einer guten Reinigungsleistung über das untere Spülluftgitter erfolgen musste.

Der Stromverbrauch der Festbettanlage verläuft nicht parallel zur Belastung (siehe Anhang A6), sondern ist massgeblich durch die erwähnten Verstopfungsprobleme geprägt.

In Perioden ohne Betriebsprobleme (September 2005 – Februar 2006) betrug der spezifische Stromverbrauch 20-23 kWh/EW_{BSB5/CSB} .a, wobei dieser Wert umso kleiner ist, je grösser die Belastung resp. Auslastung der Festbettanlage (siehe Anhang A6/A7). In Perioden mit Verstopfungsproblemen stieg der spezifische Stromverbrauch auf Werte über 30 kWh/ EW_{BSB5/CSB} .a.



Figur 11: prozentuale Aufteilung Stromverbrauch Festbett ARA Lyss (Jan 05 – Okt 06)

Die Gebläse zur Belüftung und Spülung der Festbettzellen weisen mit durchschnittlich 76 % den grössten Stromverbrauch der Festbettanlage auf (siehe Fig. 11). Der restliche Stromverbrauch verteilt sich gleichmässig auf die übrigen Stromverbraucher.

5.5 EINSARPOTENZIAL STROMVERBRAUCH FESTBETTANLAGE

Im Verlauf der Untersuchungsperiode wurden bereits Massnahmen zur Reduktion des Stromverbrauchs unternommen:

- Verkleinerung Rezirkulationsmenge
- Verkleinerung Lufteintrag bezogen auf die Ammoniumbelastung

Das grösste Einsparpotential weisen Massnahmen auf, welche die Verstopfung der Festbettzellen verhindern. Der Einfluss der ARA Lyss auf diese Massnahmen ist jedoch beschränkt, da diese vom verursachenden Grosseinleiter zu treffen sind. Diese Massnahmen würden nicht nur den Stromverbrauch für die Gebläse senken, sondern auch den Stromverbrauch für die Förderung des Schlammwassers und Klarwassers, da die Anzahl der Zellenspülungen zurückgehen würde.

Als einziges Einsparpotential verbleibt der Stromverbrauch für die Rührwerke Schlammwasserbecken. Wir empfehlen, die Rührwerke versuchsweise im Intervallbetrieb (statt Dauerbetrieb) zu fahren, um zu testen, ob die Schlammwasserbehandlung auch bei vermindertem Rühreffekt betrieben werden kann. Unter der Annahme, dass die Betriebszeit der Rührwerke halbiert werden kann, lassen sich rund 150 kWh/d einsparen.

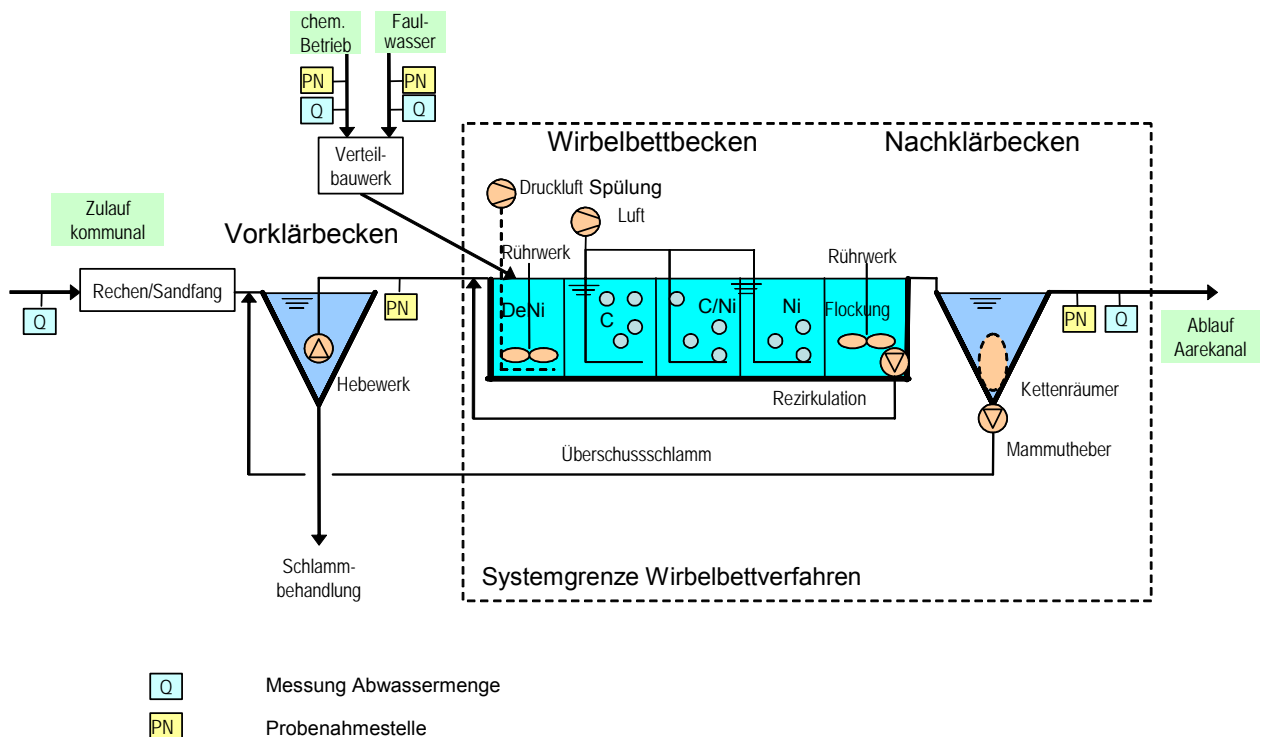
6. Untersuchung Wirbelbettanlage ARA Wohlen

6.1 BESCHREIBUNG DER ANLAGE

Das 4-strassige, herkömmliche Belebtschlammverfahren der ARA Wohlen wurde zu einem Wirbelbettverfahren umgebaut und im Jahr 2004 in Betrieb genommen.

Das Rohabwasser durchläuft einen Rechen und einen Sandfang, bevor es in das Vorklärbecken gelangt. Zwei drehzahlgeregelte Hebwerke pro Strasse (Höhendifferenz 1.2 m) fördern das vorgeklärte Abwasser in die Denitrifikationsbecken der biologischen Reinigungsstufe (siehe Fig. 12). Beim Umbau wurden die Becken erhöht, um mehr Volumen zu erhalten. Der höhere Wasserspiegel der biologischen Stufe ist nötig, damit genügend Beckenvolumen erreicht wird.

Die biologische Reinigungsstufe ist unterteilt in vier Wirbelbett-Becken (4 Strassen à 4 x 325 m³), wo nacheinander die Denitrifikation (1. Becken), der Kohlenstoffabbau (2./3. Becken) und die Nitrifikation (3./4. Becken) stattfinden (siehe Fig. 13). Die Biomasse haftet auf Trägermaterialien des Fabrikates KALDNES. Die zylindrischen Trägerelemente (siehe Fig. 14) bestehen aus Polyethylen mit einer Dichte von 0.92 - 0.96 g/cm³ und haben einen Durchmesser von 10 mm und eine Höhe von ca. 7 mm. In der Mitte befindet sich ein über die Höhe des Körpers erstreckendes Kreuz und an der Aussenseite sind etwa 1 mm hohe longitudinale Rippen angeordnet. Bei einem Füllgrad von ca. 55 % ergibt sich eine effektive Wachstumsfläche von 275 m²/m³. Die Umwälzung der Trägerelemente erfolgt in den Denitrifikationsbecken durch Rührwerke und in den restlichen Becken durch die Turbulenzen des Lufteintrags. Für die Belüftung (Sauerstoffeintrag, Erzeugen von Turbulenz für Schlammabrieb an Trägerelementen) sorgt eine Gebläsestation mit drei drehzahlgeregelten Gebläsen.



Figur 12: Schema der ARA Wohlen

Den Wirbelbett-Becken ist ein Flockungsbecken nachgeschaltet, in dem der Überschussschlamm zu sedimentierbaren Partikeln geflockt wird. Ein Rührwerk pro Becken sorgt für die Umwälzung des Beckeninhaltes. Ebenfalls im Flockungsbecken befindet sich pro Becken eine drehzahlgesteuerte Rezirkulationspumpe, die das nitrathaltige Abwasser der Denitrifikation zuführt.

Im nachfolgenden Nachklärbecken findet die Trennung des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches statt. Der Schlamm sedimentiert am Boden und wird durch einen Unterwasser-Kettenräumer kontinuierlich geräumt, durch Mammuthheber abgezogen und über Sedimentation im Vorklärbecken der Schlammbehandlung zugeführt.



Figur 13: Nitrifikationsbecken mit Trägerkörpern



Figur 14: Trägerkörper System KALDNES

6.2 BELASTUNG, REINIGUNGSLEISTUNG UND BETRIEB WIRBELBETTANLAGE

Die Schmutzfrachten, die ins Wirbelbett eingeleitet werden, stammen einerseits aus dem kommunalen Zulauf aber auch aus der Einspeisung eines chemischen Betriebes und intern aus den Rückläufen aus der Schlammbehandlung (Faulwasser). Während das kommunale Abwasser über den Ablauf der Vorklärbecken in die biologische Reinigungsstufe (Wirbelbett) gelangt, werden die Zuläufe des chemischen Betriebes und des Faulwassers direkt in die Denitrifikationsbecken eingeleitet. Für die gleichmässige Verteilung auf die vier Becken sorgt in diesem Falle ein Wasserverteilmwerk. Die Abwassermengen und Frachten der kommunalen, der industriellen wie auch der internen Einspeisung werden einzeln erfasst. Jene Frachten, die das Wirbelbett verlassen, werden im Ablauf der Nachklärung erhoben.

Im Untersuchungszeitraum März 2005 bis Oktober 2006 ist eine deutliche jahreszeitliche Schwankung der mittleren Kohlenstoffbelastung (CSB, BSB₅) feststellbar (siehe Anhang B1/B2). Die Stickstoffbelastung (Ammonium) folgt demselben Jahresgang, allerdings etwas weniger ausgeprägt.

Der chemische Produktionsbetrieb liefert stark nitrathaltiges vorgeklärtes Abwasser. Die Fracht ist stark schwankend. Seit Juni 2006 ist das Abwasser hingegen nahezu nitratfrei.

Tabelle 7 zeigt die unterschiedliche jahreszeitliche Belastung der ARA Wohlen in den Zeiträumen Winter - Frühling und Sommer - Herbst. Bezüglich Abwassermenge und Kohlenstoffbelastung bestehen grössere Kapazitätsreserven. Im Bezug auf Ammonium ist der Auslastungsgrad relativ hoch.

Parameter	Ausbaugrösse Annahme 80%-Werte	Zeitraum März 05 – Okt. 06			Zeitraum Winter - Frühling März 05 – Mai 05; Dez 05 – Mai 06			Zeitraum Sommer - Herbst Juni 05 – Nov. 05; Juni 06 – Okt. 06		
		Mittelwert	80% Wert	Auslast.	Mittelwert	80% Wert	Auslast.	Mittelwert	80% Wert	Auslast.
hydr. Kapazität [l/s] Abw.-menge [m ³ /d]	500	160 14'100	230 19'600	46%	190 16'700	270 23'200	54%	140 12'200	170 14'800	34%
CSB [EW _{CSB}]	73'000	38'300	48'500	66%	46'100	54'200	74%	32'100	41'000	56%
BSB ₅ [EW _{BSB5}]		39'900	50'800		48'900	62'300		32'800	42'500	
NH ₄ -N [EW _{NH4-N}]	40'000	30'700	35'500	89%	34'300	37'800	95%	28'900	33'200	83%
NO ₃ -N _{chem. Betr.} [kg/d]		90	180		165	235		40	65	

Tabelle 7: Auslegung und Belastung Wirbelbett ARA Wohlen

Die Einleitbedingungen (siehe Tab. 8) werden für GUS, BSB₅, Gesamtphosphor und Ammonium eingehalten. Der Grenzwert für gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) und der Richtwert für Nitrit (NO₂-N) werden teilweise überschritten.

Parameter		Abflusskonzentrationen			Abbauleistung
		90%-Wert [mg/l]	Höchstwert [mg/l]	Jahresmittel [mg/l]	90%-Wert bezogen auf Rohabwasser [%]
Gesamte ungelöste Stoffe	GUS	15	50		
Biochemischer Sauerstoffbedarf	BSB ₅	15	40		90
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB				
Gelöster organischer Kohlenstoff	DOC	10	20		85 bezogen auf TOC
Ammonium	NH ₄ -N	2			90 bezogen auf N _{Kjel}
Nitrit (Richtwert)	NO ₂ -N	0.3			
N-Elimination	N _{tot}				
Gesamtphosphor	P _{tot}			0.8	80

Erläuterungen zu Grenzwerten:

90%-Wert: Dieser Wert darf höchstens in 10% aller 24-Stunden-Mischproben überschritten werden.

Höchstwert: Dieser Wert muss in der 24-Stunden-Mischprobe immer unterschritten werden.

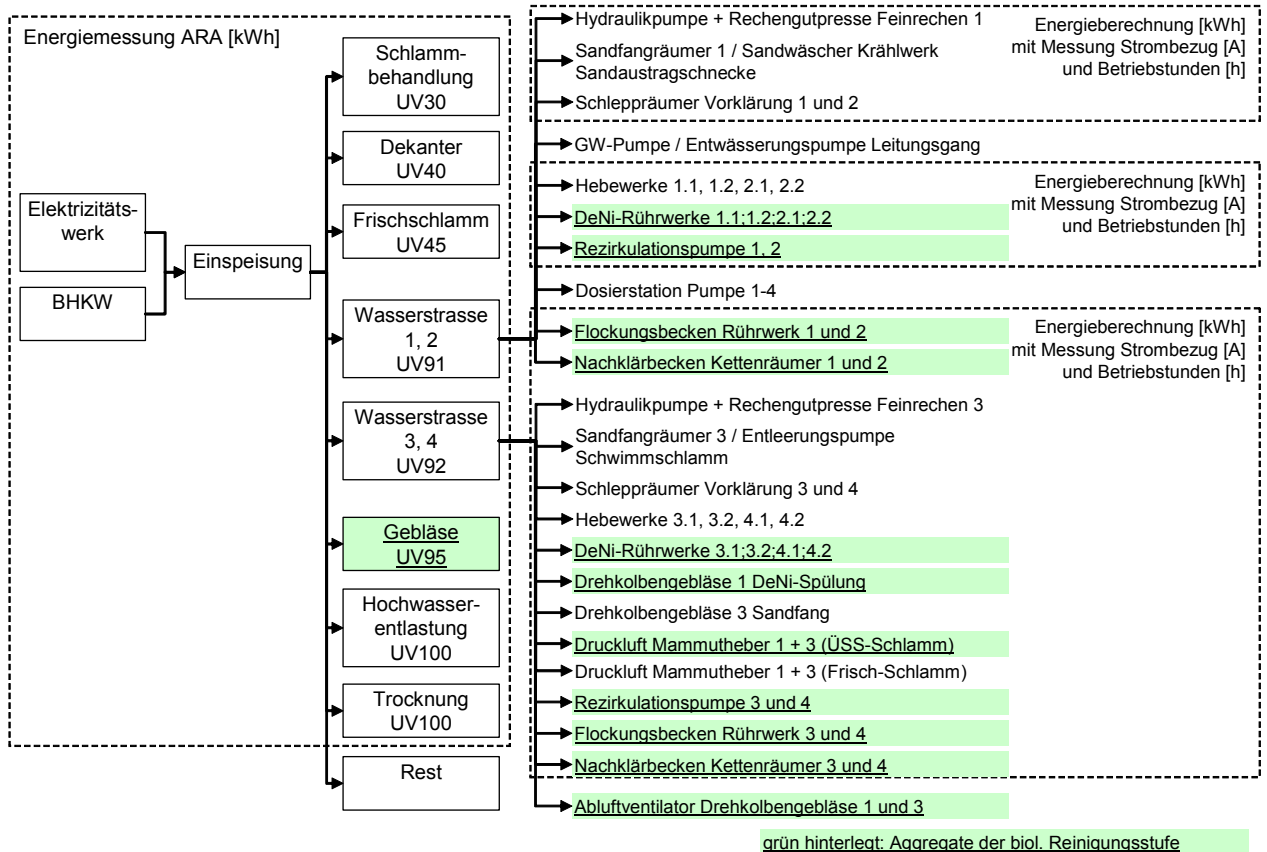
Tabelle 8: Anforderungen an die Reinigungsleistung (Einleitbedingungen) der ARA Wohlen

Die mittlere Stickstoffelimination der Wirbelbettanlage in der Untersuchungsperiode betrug 60 % (siehe Anhang B3). Bis Februar 2006 betrug die Rezirkulationsmenge rund die zweifache Abwassermenge, ungeachtet der zufließenden Nitratfracht im Abwasser des chemischen Produktionsbetriebes. Ab März 2006 wurde die Rezirkulationsmenge deutlich gedrosselt, um der zufließenden Nitratfracht Rechnung zu tragen. Ab Juni 2006 blieben jedoch die Nitritfrachten im Zulauf Wirbelbett fast gänzlich aus. Da die Rezirkulationsmengen nicht wieder angehoben wurden, verharrte die Stickstoffelimination auf Werten von ca. 50 %.

6.3 MESSUNG STROMVERBRAUCH

In der ARA Wohlen werden die Stromdaten gemäss Figur 15 erfasst. Auf der Anlage existieren Stromzähler, die die externe (Elektrizitätswerk) und interne (BHKW) Einspeisung erfassen. Auf der Verbraucherseite werden die verschiedenen Energiebezüger anhand ihrer Funktion zu Gruppen zusammengefasst. Die Gruppen werden mit Stromzählern (UV30 usw.) gemessen. Für die biologische Reinigungsstufe sind die Messungen der Wasserstrasse 1, 2 (UV91), die Messung der Wasserstrasse 3, 4 (UV92) sowie der Gebläse (UV95) von Bedeutung. Bei den Messungen der Wasserstrassen sind jeweils auch Aggregate des Rechens, des Sandfangs, der Vorklärung und diverse Aggregate (aus Sicht des Stromverbrauches unbedeutend) enthalten, die nicht der biologischen Reinigungsstufe zugewiesen werden können. Die Messung UV95 beinhaltet nur die Biologiegebläse (Belüftung).

Die Messdauer erstreckte sich von März 2005 bis Oktober 2006.



Figur 15: Erfassung Stromverbrauch ARA Wohlen

Der Energieverbrauch der einzelnen Aggregate wird nicht erfasst. Er wurde im Rahmen dieser Untersuchung gemäss Formel {5} berechnet. Die berechneten Leistungsaufnahmen gemäss Formel {4} wurden zur Kontrolle den betreffenden Nennleistungen gegenübergestellt.

Bei der Ermittlung der Ausgangsdaten wurde ein allfälliger FU-gesteuerter, gedrosselter Betrieb des Motors berücksichtigt. Zur Vereinfachung wurde der massgebende Betriebszustand der FU-Steuerung angenommen.

Bei der Auswertung der Daten erwies sich die interne Aufzeichnung der externen Einspeisung (Elektrizitätswerk) als falsch. Im Vergleich zu den Rechnungen und Ablesungen des Elektrizitätswerkes, lag ein Fehlerfaktor von ca. 3.5 vor. Die Daten und die weiteren Aufzeichnungen wurden entsprechend korrigiert bzw. die offiziellen Werte des Elektrizitätswerkes übernommen.

Die Summe des mit der Formel {5} berechneten Stromverbrauches aller dem Zähler UV92 (Wasserstrasse 3, 4) zugewiesenen Aggregate lag im Durchschnitt 15 % über der Strommessung am Zähler UV92. Diese Differenz wird aufgrund der Unsicherheiten bei der Erfassung der Ausgangsdaten der Berechnung als tolerierbar erachtet. Die berechnete Leistungsaufnahmen der einzelnen Aggregate gemäss Formel {4} entsprechen im Grossen und Ganzen der installierten Leistung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Berechnung des Stromverbrauches mit diesen Ausgangsdaten der Realität entspricht.

Die Summe des mit der Formel {5} berechneten Stromverbrauches aller dem Zähler UV91 (Wasserstrasse 1, 2) zugewiesenen Aggregate lag im Durchschnitt 65 % über der Strommessung am Zähler UV91. Der Vergleich zur Strommessung UV92, die abzüglich der Drehkolbengebläse und Druckluftheber etwa gleiche Werte wie die UV91 aufweisen sollte, bestärkte die Vermutung, dass der Zähler UV91 einen Fehlerfaktor von ca. 0.67 (2/3) aufweist. Die Werte am Zähler UV91 wurden entsprechend korrigiert, so dass die Summe der einzelnen Verbraucher schlussendlich im Durchschnitt 10 % über der Strommessung am Zähler UV91 liegt.

Erstellt man unter Einbezug der erwähnten Korrekturen die Bilanz von Einspeisung (EW + BHKW) und Verbrauch (Verbrauchergruppen UV30 usw.), so liegt die Summe der Verbraucher rund 10 % unter der Summe der Einspeisungen.

Mit den erwähnten Bilanzierungen, Berechnungen und Messungen sind die beschriebenen nötig gewordenen Korrekturen der Strommessungen überprüft und werden als plausibel beurteilt.

Tabelle 9 zeigt eine Übersicht über die erwähnten Abweichungen und über die getroffenen Korrekturen.

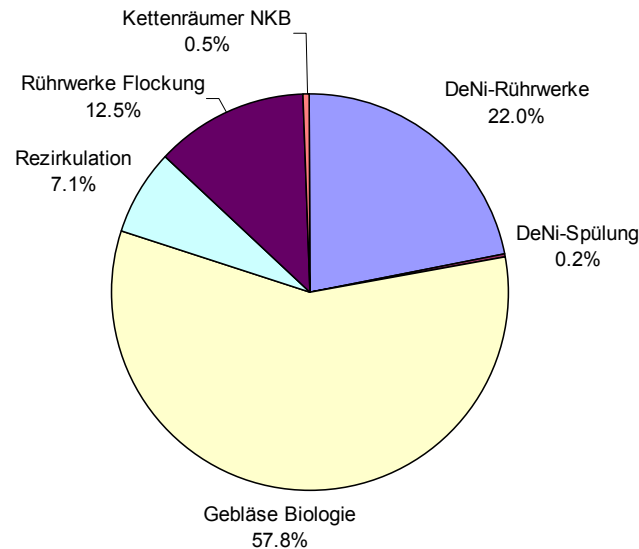
Messung EW	Interne Messung	Berechnete Summe der einzelnen Verbraucher
Einspeisung 100 % EW	Einspeisung EW ca. 350 % <u>Korrekturfaktor 0.29 ($1/3.5$)</u>	
	UV91 100 % <u>Korrekturfaktor 1.5 ($1/0.67$)</u>	innerhalb UV91 165 % nach Korrektur an UV 91 → 110 %
	UV92 100 %	innerhalb UV92 115 %
	Summe Einspeisung nach Korrektur an interne Einspeisung EW → 100 %	
	Summe Verbraucher 90 % (UV30 usw.)	

Tabelle 9: Abweichungen und getroffene Korrekturen bei den Strommessungen

Aufgrund der erwähnten Erfahrungen über die Genauigkeit der Strommessungen müssen Messungen wie auch Berechnungen mit gewissen Unsicherheiten betrachtet werden. Die Unsicherheiten entsprechen ca. 10 bis 20 % der gemessenen oder berechneten Werte.

6.4 STROMVERBRAUCH WIRBELBETTANLAGE

Der Energieverbrauch der biologischen Reinigungsstufe der ARA Wohlen wird durch die Gebläse dominiert, die für den Sauerstoffeintrag des Kohlenstoffabbaus und der Nitrifikation sowie für eine genügende Turbulenz in den Wirbelbecken sorgen. Weiter markante Verbraucher sind die Rührwerke der Denitrifikations- und der Flockungsbecken (siehe Fig. 16).



Figur 16: prozentuale Aufteilung Stromverbrauch Wirbelbett ARA Wohlen

Die in Tabelle 7 und Anhang B1/B2 aufgeführten jahreszeitlichen Belastungsschwankungen haben kaum Einfluss auf den Stromverbrauch der Wirbelbettanlage (siehe Anhang B5/B6). Der durchschnittliche tägliche Stromverbrauch und somit massgeblich der Stromverbrauch der Gebläse zeigt in diesen Betrachtungszeiträumen mit 3'700 kWh (Zeitraum Winter/Frühling) bzw. 3'500 kWh (Zeitraum Sommer/Herbst) nur geringe Schwankungen.

Dies ist auf zwei Umstände zurückzuführen:

- Der Sauerstoffeintrag und somit der Gebläsebetrieb wird primär durch die Anforderung, genügend Turbulenz im Wirbelbett zu erzeugen, gesteuert.
- Der Betrieb der insgesamt 3 frequenzgesteuerten Gebläse läuft lastabhängig zeitweise nur mit einem Gebläse und minimaler Frequenz (45 %). Die Anforderung an eine genügende Erzeugung von Turbulenz im Wirbelbett gibt unabhängig vom Sauerstoffgehalt einen minimalen Lufteintrag vor. Die einzelnen Gebläse können nicht weiter gedrosselt werden.

Der spezifische Stromverbrauch schwankt entsprechend zwischen 42 kWh/EW_{BSB5/CSB.a} und 29 kWh/EW_{BSB5/CSB.a}. Der Mittelwert beträgt 36 kWh/EW_{BSB5/CSB.a}.

Die installierte Leistung der Rührwerke beträgt in den Denitrifikationsbecken (je 2 Rührwerke à 5 kW) rund fünfmal so viel wie der Richtwert von 1 kW (Richtwert 1.5 - 2.0 Wh/m³ Beckeninhalt, Handbuch Energie in Kläranlagen [2]). Im Flockungsbecken (je ein Rührwerk à 2 kW) ist die installierte Leistung doppelt so hoch wie der Richtwert. Die höhere Leistung und der höhere Stromverbrauch im Denitrifikationsbecken sind zu erwarten, weil durch die Anwesenheit der Trägerkörper eine höhere Turbulenz nötig ist, um eine genügende Durchmischung des Beckeninhaltes zu erreichen.

In einer Versuchphase wurde der Betrieb der Rührwerke im Denitrifikationsbecken reduziert. Weil die Leistungsaufnahme der Rührwerke fest ist und somit nicht reguliert werden kann, wurde die Reduktion mit der teilweisen Ausserbetriebnahme des 2. Rührwerkes erreicht. Der Betrieb wurde folgend umprogrammiert: 15 Minuten Einzelbetrieb → 5 Minuten Parallelbetrieb → 15 Minuten Einzelbetrieb usw. Der Energieverbrauch konnte im Zeitraum Juni bis August 2006 von durchschnittlich 800 kWh/Tag auf 500 kWh/Tag reduziert werden.

Die Reduktion des Betriebes der Rührwerke im Flockungsbecken kann nur mit dem intermittierenden Betrieb des einzelnen Rührwerkes erreicht werden und wurde im Rahmen dieser Studie nicht weiter untersucht.

Die frequenzgesteuerten Pumpen laufen in 90 % der Zeit mit voller Leistung. Die Pumpen haben die Funktion, die Denitrifikationsbecken mit nitratreichem Abwasser aus dem Ablauf der Nitrifikationsbecken zu versorgen. Nun befindet sich die ARA Wohlen in der speziellen Lage, zeitweise extern nitratreiches Abwasser aus dem Zulauf des chemischen Betriebes zu erhalten, das in die Denitrifikationszone eingeleitet wird. Die interne Rezirkulation ist also zumindest zeitweise nicht erforderlich oder kann reduziert werden. In einer Versuchsphase von März bis August 2006 konnte der Energieverbrauch von ursprünglich rund 300 kWh/Tag auf 150 kWh/Tag halbiert werden.

Eine energetische Optimierung der Rezirkulation erschwert der Umstand, dass der Nitrategie des chemischen Betriebes stark schwankend (10 bis 300 kg/Tag) und unvorhersehbar ist. Im Zeitraum Juli bis Oktober 2006 blieb der externe Nitrategie nahezu aus. Weil die Rezirkulationspumpen in dieser Versuchsphase reduziert betrieben wurden, erhielten die Denitrifikationsbecken möglicherweise zu geringe Nitratfrachten. Es konnte eine schwarze Verfärbung der Biomasse auf den Trägerkörpern festgestellt werden, was auf anaerobe Verhältnisse hindeutet.

6.5 EINSPARPOTENZIAL STROMVERBRAUCH WIRBELBETTANLAGE

Um den Stromverbrauch zu senken, empfehlen wir, folgende Massnahmen zu prüfen:

- | | |
|--|---|
| 1 Reduktion der Anzahl betriebener Abwasserstrassen | Das Wirbelbett wird bezüglich Abwassermenge und Kohlenstofffracht schwach belastet. Es ist zu prüfen, ob die Anzahl betriebener Abwasserstrassen dauernd oder zeitweise reduziert werden kann. |
| 2 Einbau Gebläse kleinerer Leistung | <p>Wegen der geringen Auslastung des Wirbelbettes, wird über längere Zeiträume nur 1 Gebläse mit der minimalen Förderleistung betrieben. Diese minimale Förderleistung ist vom Lieferanten vorgegeben zur Aufrechterhaltung einer genügend grossen Turbulenz in den Wirbelbettbecken der 4 Abwasserstrassen. Mit dem Einbau eines kleineren Gebläses könnte in Schwachlastzeiten Versuche mit reduzierter Belüftung vorgenommen werden.</p> <p>Massnahme 2 ist Voraussetzung dafür, dass mit der Massnahme 1 der Stromverbrauch deutlich gesenkt werden kann, weil mit der Massnahme 1 nur dann wesentlich Energie eingespart werden kann, wenn das Gebläse mit geringerer Leistung gefahren werden kann. Dies ist heute nicht möglich.</p> |
| 3 Steuerung Rezirkulation in Abhängigkeit des Nitratgehaltes im Denitrifikationsbecken | Die Nitratfracht im Abwasser des chemischen Produktionsbetriebes ist starken, unvorhersehbaren Schwankungen unterworfen. Damit die Denitrifikationsstufe optimal betrieben werden kann, empfehlen wir, die Rezirkulationspumpen nach dem Nitratgehalt im Denitrifikationsbecken zu steuern. Mit dieser Massnahme kann sowohl der Stromverbrauch für die Rezirkulationspumpen, wie auch der Gebläse reduziert werden. |
| 4 Reduktion der Betriebszeiten der Rührwerke Denitrifikationsbecken | Während des Versuchsbetriebes der Rührwerke der Denitrifikationsbecken wurde eine Energieeinsparung um einen Drittel festgestellt. Unter der Annahme, dass der im Laufe des Versuches aufgetretene, schwarze Schlamm auf den Trägerkörper nicht auf die reduzierte Umwälzung, sondern auf die ungenügende Nitratzufuhr zurückzuführen ist, empfehlen wir, den Versuch bei genügender Nitratzufuhr nochmals zu wiederholen. |

Unter der Annahme, dass die baulichen und steuerungstechnischen Voraussetzungen für die Umsetzung der Massnahmen geschaffen sind, lassen sich schätzungsweise rund 750 kWh/d einsparen. Das entspricht 20 % des Stromverbrauches der Wirbelbettanlage bzw. ca. 15 % des gesamten Stromverbrauches der ARA Wohlen.

7. Untersuchung Membran-Belebtschlammverfahren ARA Wädenswil

7.1 BESCHREIBUNG DER ANLAGE

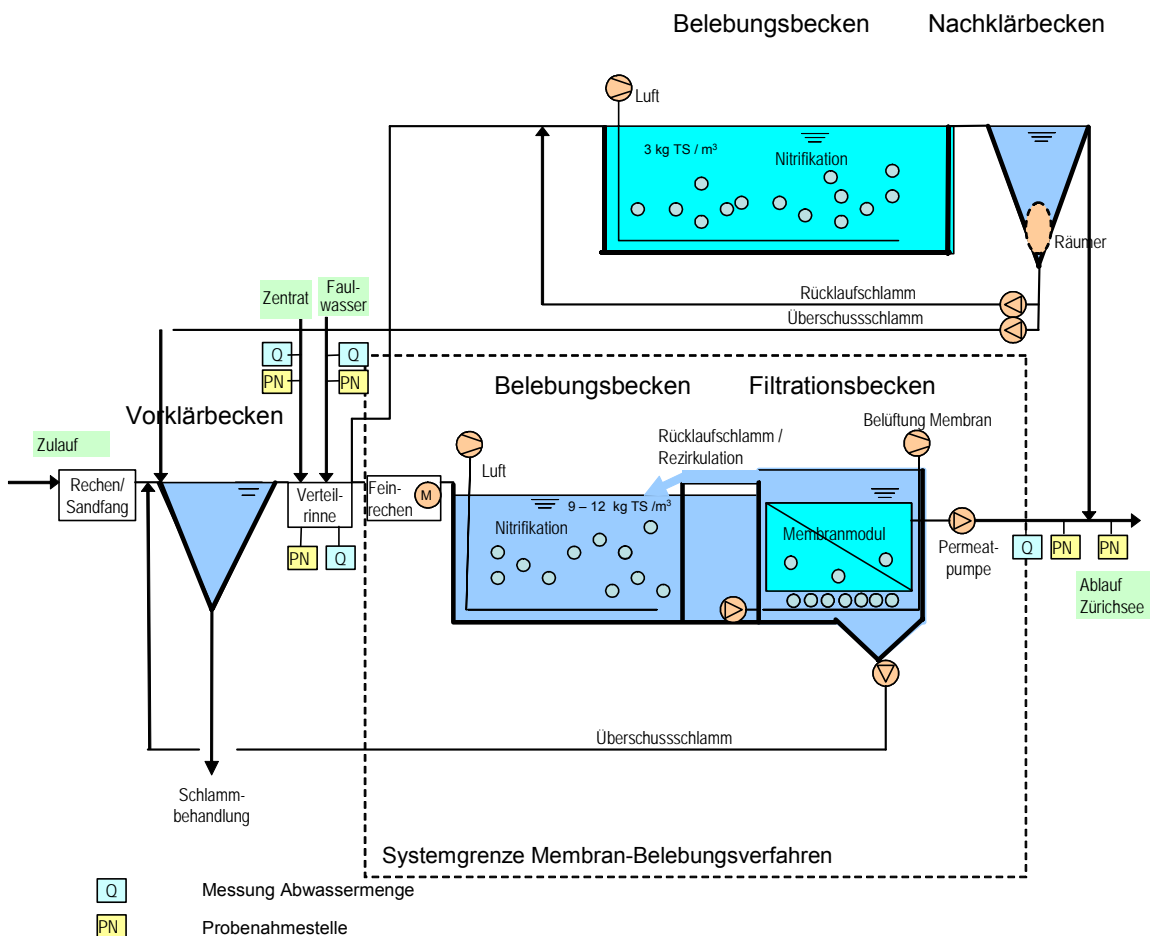
Das ursprünglich vierstrassige Belebtschlammverfahren der ARA Wädenswil wurde in zwei Strassen (Strasse 3 und 4) zu einem Membran-Belebtschlammverfahren umgebaut. Dabei wurden diese je in ein Belüftungsbecken und ein Filtrationsbecken unterteilt. Die Strassen 1 und 2 werden nach wie vor als konventionelle Belebtschlammanlage mit Nachklärbecken betrieben. Ziel des Umbaus war primär das Erreichen der strengen Grenzwerte bezüglich GUS (gesamte ungelöste Stoffe) und Gesamtphosphor im Kläranlagenablauf. Das Membran-Belebtschlammverfahren der ARA Wädenswil ist seit Ende 2005 in Betrieb.

Das Rohabwasser gelangt über einen Grob- und Feinrechen, einen Sandfang und die Vorklärbecken in die biologische Reinigungsstufe (siehe Fig. 17). Der Zulauf der Membranbiologie (Strasse 3 und 4), der im freien Gefälle erfolgt, wurde mit einem Feinrechen ergänzt.

Die bestehenden Belebungsbecken (ca. 410 m³) dienen im Membran-Belebungsverfahren wie bisher der biologischen Abwasserreinigung mit Belebtschlamm (siehe Fig. 18). Die Belebtschlammkonzentration wurde von ursprünglich ca. 3 kg TS / m³ Belüftungsbecken auf 9-12 kg TS/m³ BB erhöht. Mit dieser Massnahme konnte das Schlammalter um Faktor 3-4 auf ca. 17 Tage erhöht werden.

Vom Belebungsbecken fliesst das Abwasser in ein Zwischenbecken, von wo es in das mit Membranmodulen bestückte, leicht erhöhte Filtrationsbecken (160 m³) gefördert wird. Die geringe Höhendifferenz zwischen Belebungsbecken und Filtrationsbecken wird durch eine drehzahlgeregelte, getauchte Propellerpumpe bewältigt. Die Pumpe fördert etwa die doppelte Abwassermenge und erfüllt den Zweck, den im Filtrationsbecken abgeschiedenen Schlamm über den Beckenüberlauf in das Belüftungsbecken rückzuführen (Rücklaufschlamm). Der Überschussschlamm wird dem Filtrationsbecken entnommen und in den Zulauf zu den Vorklärbecken gefördert.

Die Anlage verfügt über keine Denitrifikationsstufe.



Figur 17: Schema der ARA Wädenswil

Als Filter dienen pro Strasse 8 Kassetten à 40 Membranmodulen des Typs Zenon ZW 500d. Bei den Membranen handelt es sich um getauchte, vertikal angeordnete Hohlfasermembrane (siehe Fig. 19) mit einem Porendurchmesser von 0.04 µm. Diese dienen der Filtration des Belebtschlammes, also der Trennung vom gereinigten Abwasser. Damit der Schlamm an den Membranen nicht aufkumuliert, wird mit einer zyklischen, grobblasigen Belüftung eine Turbulenz erzeugt, die für den Abtrag des Schlammes von den Membranen sorgt. Die Belüftung erfolgt in kurzen Intervallen von je ca. 10 Sekunden Betrieb und 10 Sekunden Pause. Durch diese Membranbelüftung gehen die biologischen Abbauprozesse auch hier weiter. Für diese Belüftung wird pro Strasse je ein separates Gebläse eingesetzt.

Der Permeatabzug erfolgt über eine drehzahlgeregelte Drehkolbenpumpe pro Strasse, die in den Membranen einen geringen Unterdruck erzeugt. Die Ansteuerung erfolgt primär über eine Füllstandsmessung im Filterbecken. Bei Trockenwetter erfolgt der Permeatabzug in Intervallen, um den Energieverbrauch zu begrenzen und die Membranen bei optimalem Durchsatz zu betreiben. Für die Membranrückspülung ist die Drehkolbenpumpe reversibel betreibbar. In Intervallen von 10 Minuten wird die Drehrichtung der Pumpe umgekehrt und für etwa 1 Minute Permeat aus dem Permeatspeicher rückwärts gefördert, d.h. von innen nach aussen durch die Membranen gedrückt. Dadurch wird die Aussenseite der Membrane von Anlagerungen befreit.



Figur 18: Becken des Membran-Belüftungsverfahrens



Figur 19: Membrane

Das gereinigte Abwasser (Permeat) ist frei von ungelösten Stoffen und wird in den Zürichsee geleitet. Das Abwasser der konventionellen Belebung (Strasse 1 und 2) wird nach der Nachklärung ebenfalls in den See geleitet.

Die Membrane müssen regelmässig vom angelagerten und in den Membranen gebildeten Schlamm sowie den anorganischen Ausfällungen gereinigt werden. Die Reinigung erfolgt über vier Reinigungstypen (siehe Tab. 10).

Reinigungsarten	Häufigkeit (Richtwerte)	Bemerkung
1 Belüftung	alle 10 sec für 10 sec	mechanisch
2 Rückspülung Pause	1 Min pro 10 Min 2 Min pro 10 Min	mechanisch
3 Unterhaltsreinigung	1 pro Woche	chemisch
4 Erneuerungsreinigung	1 - 2 pro Jahr	chemisch, bei entleertem Becken

Tabelle 10: Reinigungsarten der Membranmodule

Bei den Reinigungen mit Chemikalien wird zusätzlich zwischen basischer und saurer Reinigung unterschieden:

- Die basische Reinigung wirkt hauptsächlich bezüglich organischer Ablagerungen. Es wird Natriumhypochlorit (Javel) eingesetzt.
- Die saure Reinigung wirkt hauptsächlich bezüglich anorganischer Ausfällungen. Sie basiert auf Zitronensäure und zusätzlich Salpetersäure zur pH-Kontrolle.

Die Salpetersäure und die Natronlauge dienen auch der Neutralisation bei der Erneuerungsreinigung.

7.2 BELASTUNG, REINIGUNGSLEISTUNG UND BETRIEB MEMBRAN-BELEGUNGSANLAGE

Die Schmutzfrachten, die in die biologische Reinigungsstufe eingeleitet werden, stammen einerseits aus dem kommunalen Zulauf (Ablauf Vorklärbecken) und aus den internen Zuläufen der Schlammbehandlung (Faulwasser + Zentrat). Die Zuläufe aus der Schlammbehandlung werden in einer den Vorklärbecken nachgeschalteten Rinne dem Ablauf der Vorklärbecken beigemischt. Von hier gelangt das Abwasser zu gleichen Teilen auf die vier Strassen der biologischen Reinigungsstufe (2 herkömmliche Belebungsbecken, 2 Membran-Belebungsbecken).

Abwassermengen und für die Untersuchung interessierenden Frachten werden in folgender Tabelle 11 erfasst:

	Abwassermenge	Frachten						
		GUS	BSB ₅	CSB	P _{tot}	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N
Ablauf VKB	x		(x)	x	x	z	z	
Zulauf Zentrat	z					z		
Zulauf Faulwasser	z					z		
Ablauf Permeat	z					z	z	
Ablauf ARA		x	(x)	x	x	x	x	x

x standardmässig erhoben

(x) standardmässig erhoben, nur wenig Werte vorhanden

z erhoben im Rahmen der vorliegenden Untersuchung

Tabelle 11: erfasste Abwasserdaten ARA Wädenswil

Die mittlere Belastung der Kläranlage im Zeitraum Januar bis Oktober 2006 ist nachfolgender Tabelle 12 zu entnehmen:

Parameter	Ausbaugrösse	Zeitraum Januar 06 – Oktober 06		
		Mittelwert	80%-Wert	Auslastung
Abwassermenge [m ³ /d]		9'100	11'900	
CSB [EW _{CSB}]	44'000	30'200	39'300	89%

Tabelle 12: Auslegung und Belastung Biologie ARA Wädenswil

Als Referenzwert für die Kohlenstoffbelastung wird der CSB verwendet. Angaben über den BSB₅ liegen nur vereinzelt vor und sind somit weniger repräsentativ und werden für die Beurteilung der Belastung nicht weiter verwendet. Der Auslastungsgrad bezüglich Kohlenstoffbelastung CSB ist relativ hoch.

Die Abwassermenge im Auslauf der Membran-Belebtschlamm-Strassen (Permeat) wird gemessen, so dass in Relation zum Ablauf des Vorklärbeckens der Ablauf aus den herkömmlichen Belebtschlamm-

Strassen berechnet werden kann. Aus dieser Berechnung ist ersichtlich, dass die beiden Verfahren gleichmässig beschickt werden, also die gleich hohe Belastung aufweisen.

Der Gesetzgeber gibt gemäss Tabelle 13 folgende Einleitbedingungen vor. Für Ammonium ist kein Grenzwert vorgegeben.

Parameter		Abflusskonzentrationen		Abbauleistung
		90%-Wert [mg/l]	Höchstwert [mg/l]	90%-Wert bezogen auf Rohabwasser [%]
Gesamte ungelöste Stoffe	GUS	5	50	
Biochemischer Sauerstoffbedarf	BSB ₅	10	40	90
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB			
Gelöster organischer Kohlenstoff	DOC	10	20	85 bezogen auf TOC
Ammonium	NH ₄ -N			
Nitrit	NO ₂ -N			
N-Elimination	N _{tot}			
Gesamtposphor	P _{tot}	0.2		80

Erläuterungen zu Grenzwerten:

90%-Wert: Dieser Wert darf höchstens in 10 % aller 24-Stunden-Mischproben überschritten werden.

Höchstwert: Dieser Wert muss in der 24-Stunden-Mischprobe immer unterschritten werden.

Tabelle 13: Anforderungen an die Reinigungsleistung der ARA Wädenswil

In der Untersuchungsperiode (Januar bis Oktober 2006) konnten die Einleitbedingungen eingehalten werden.

In den Monaten Januar bis Juli 2006 fand keine oder nur eine teilweise Nitrifikation statt, mit Ablaufkonzentrationen von 10 bis 30 mg NH₄-N pro Liter. Seit August 2006 wird das Ammonium vollständig nitrifiziert.

Die Auswertung der seit Juni 2006 erhobenen Stickstoffwerte im vorgeklärten und gereinigten Abwasser deutet auf einen markanten Stickstoffabbau in der biologischen Reinigungsstufe hin. Da die Anlage über keine Denitrifikationsstufe verfügt, ist unklar, wie diese Stickstoffelimination zu Stande kommt. Eine Überprüfung der Stickstoffanalysen ist angezeigt.

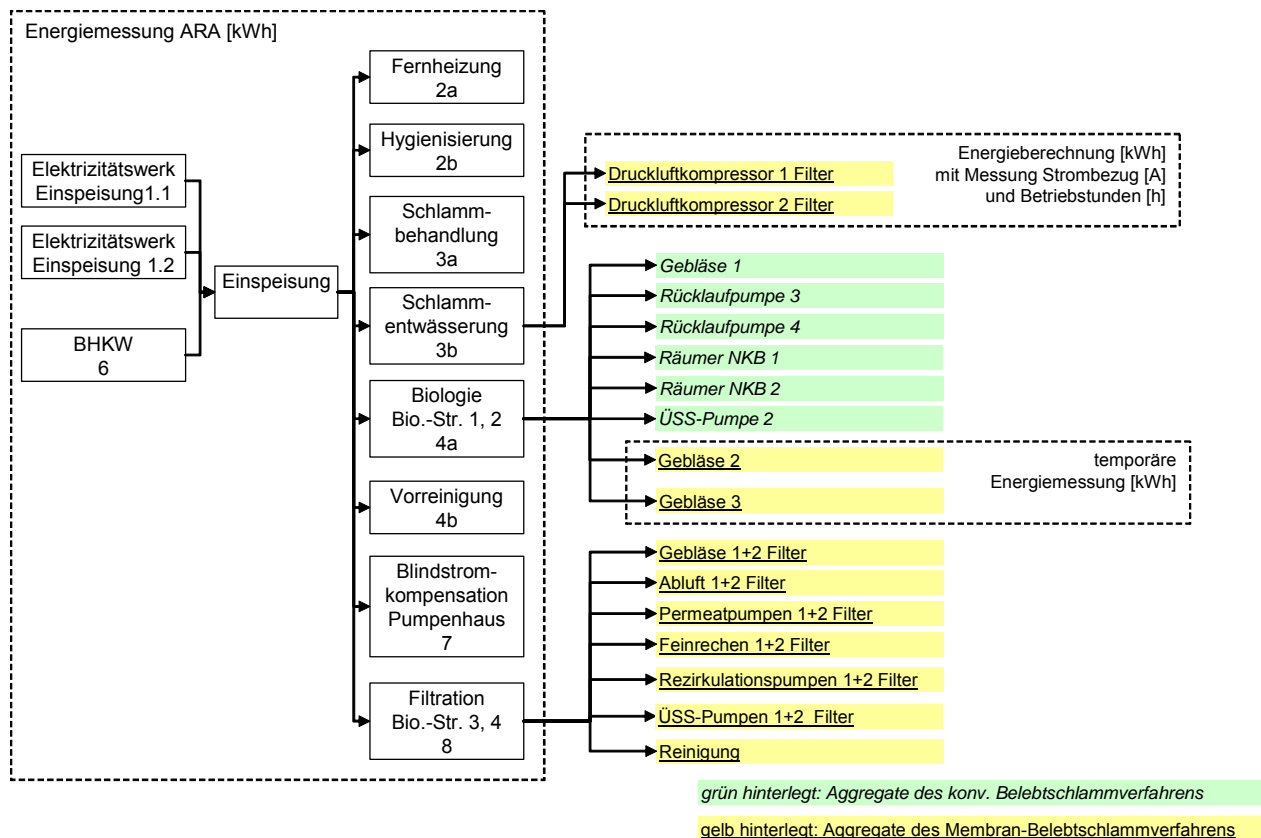
7.3 MESSUNG STROMVERBRAUCH

In der ARA Wädenswil werden die Stromdaten gemäss nachfolgendem Schema erfasst (siehe Fig. 20). Auf der Anlage existieren Stromzähler, die die externe (Elektrizitätswerk) und interne (BHKW) Einspeisung erfassen. Auf Verbraucherseite werden die verschiedenen Energiebezüger anhand ihrer Funktion zu Gruppen zusammengefasst. Die Gruppen werden mit Stromzählern (2a, 2b usw.) gemessen. Für die biologische Reinigungsstufe sind die Messungen der Biologie (Biologiestrasse 1 und 2, 4a), die Messung der Filtration (Biologiestrasse 3 und 4, 8) sowie der Schlammmentwässerung (3b) von Bedeutung.

Es gilt zu beachten, dass die Gebläse (Gebläse 2+3) für die Belebungsbecken der Membranbiologie auf dem Zähler der Biologie, also dem konventionellen Belebungsverfahren, erfasst werden. Für diese Gebläse wurden temporäre Messgeräte eingerichtet, damit ihr Anteil am Stromverbrauch in der Energiebilanz den Werten vom Zähler 4a (Biologie) subtrahiert und den Werten des Zählers 8 (Filtration) addiert werden kann. Im Weiteren sind die Druckluftkompressoren 1+2 der Filtration zu berücksichtigen, die auf dem Zähler 3b (Schlammmentwässerung) erfasst werden. Ihr Energieverbrauch wurde berechnet, indem deren Strombezug am Ampèremeter und die Betriebsstunden erfasst wurden (Formel {5}).

Der Stromverbrauch der einzelnen Aggregate der Filtration des Membran-Belebungsverfahrens, die mit der Messung 8 (Filtration) aufgezeichnet werden, kann nicht einzeln erfasst werden. Die massgebenden Motoren der Gebläse, der Permeatpumpen und der Rezirkulationspumpen sind FU-gesteuert und deren Betrieb stark schwankend, so dass eine Berechnung über Betriebsstunden und Stromaufnahme zu keinen verlässlichen Werten führen würde.

Der Stromverbrauch wurde in der Periode vom Juni bis Oktober 2006 erfasst. Aufgrund der relativ kurzen Messdauer sind Aussagen zum Stromverbrauch nur beschränkt aussagekräftig.



Figur 20: Erfassung Stromverbrauch ARA Wädenswil

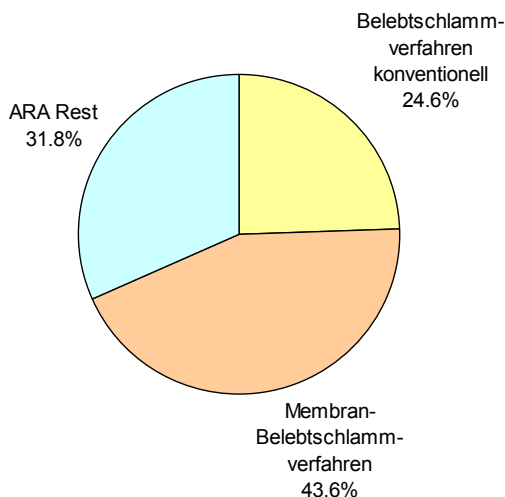
Die Energiebilanz über die Summe der Einspeisung (1, 6) und die Summe der einzelnen Verbrauchergruppen (2-4, 7+8) stimmt sehr gut überein (Abweichung < 1 %).

Weitere Überprüfungsmöglichkeiten sind nicht gegeben, weil innerhalb der Verbrauchergruppen keine Messungen vorliegen und Berechnungen über Pumpenstunden und Leistungsaufnahme aufgrund des hohen Anteils an FU-gesteuerten Motoren nicht zum Ziel führen.

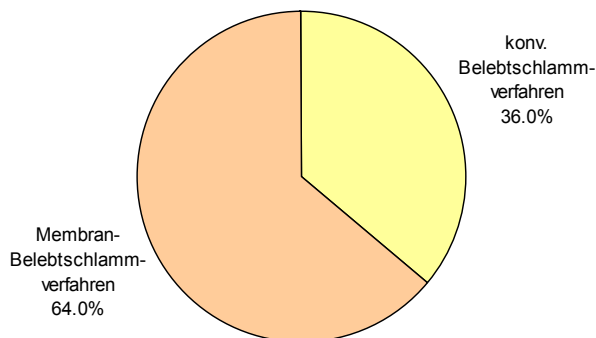
7.4 STROMVERBRAUCH MEMBRAN-BELEBTSCHLAMMVERFAHREN

Drei Viertel des Gesamtstromverbrauchs der ARA gehen zu Lasten der biologischen Reinigungsstufe. Das Membranbelebungsverfahren benötigt ca. doppelt soviel Strom wie das konventionelle Belebungsverfahren (siehe Fig. 21 und 22).

Im Zeitraum Juni bis Oktober 2006 betrug der durchschnittliche Energieverbrauch der gesamten Kläranlage 4'400 kWh/d. Davon beträgt der Anteil des konventionellen Belebtschlammverfahrens 1'100 kWh/d und jener des Membran-Belebtschlammverfahrens 1'900 kWh/d. Der spezifische Energieverbrauch des konventionellen Belebtschlammverfahrens beträgt 31 kWh/EW_{CSB.a}, jenes des Membran-Belebtschlammverfahrens 54 kWh/EW_{CSB.a}.



Figur 21: Stromverbrauch ARA Wädenswil Total



Figur 22: Stromverbrauch Biologische Reinigungsstufe ARA Wädenswil

Eine Korrelation des Stromverbrauchs mit der CSB-Belastung ist während der Beobachtungsdauer vom Juni bis Oktober 2006 sowohl beim konventionellen wie auch beim Membran-Belebtschlammverfahren nicht festzustellen.

7.5 EINSARPOTENZIAL STROMVERBRAUCH WIRBELBETTANLAGE

Die ARA Wädenswil wurde seit Inbetriebnahme im Dezember 2005 noch nicht energetisch optimiert. Es ist anzunehmen, dass Einsparungen möglich sind. Potenzial wird bei einem intermittierenden Betrieb der Gebläse der Filtrationsbecken vermutet. Das Einsparpotenzial wird auf 200 bis 300 kWh/Tag geschätzt. Das entspricht rund 10 bis 15 % des Stromverbrauchs des Membran-Belebtschlammverfahrens bzw. rund 5 % des gesamten Stromverbrauchs der ARA Wädenswil.

8. Vergleich Stromverbrauch der biologischen Reinigungsverfahren

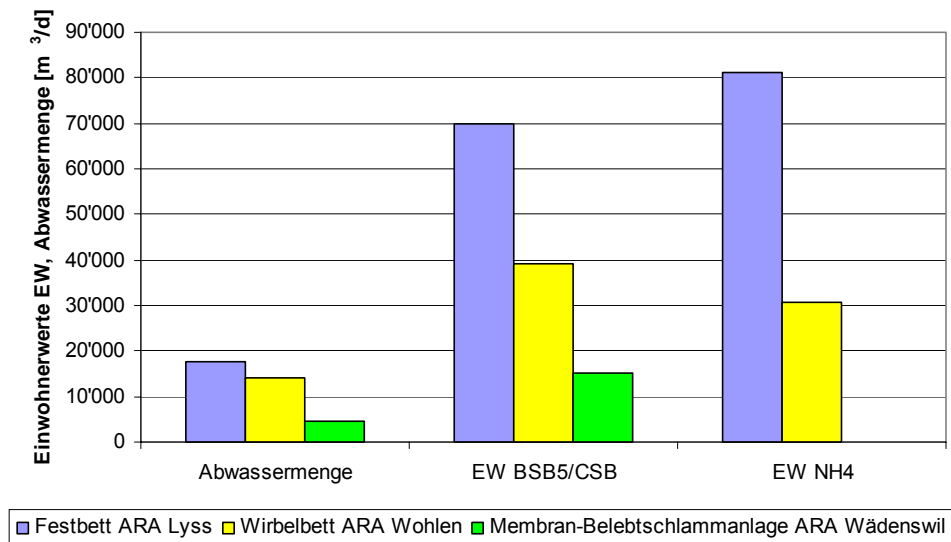
8.1 BETRIEBLICHE VORAUSSETZUNGEN

Bei der Beurteilung des Stromverbrauches der drei Kläranlagen ist zu berücksichtigen, dass sich die Anlagen bezüglich Stromverbrauchsoptimierung, Ausbaugrösse, Belastung und Auslastung (= Belastung / Ausbaugrösse) unterscheiden (siehe Fig. 23, Fig. 24 und Tab. 14).

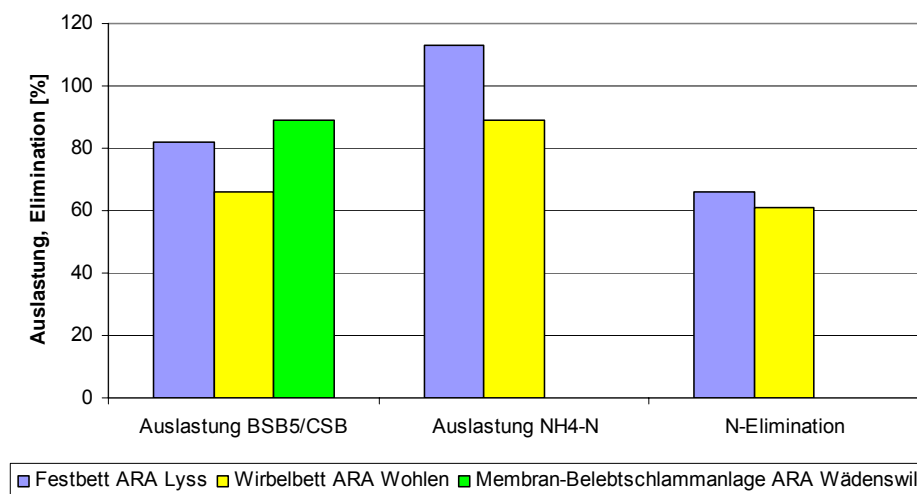
Anlage	In-betrieb-nahme	Untersuchungs-periode	mittlere Belastung			Auslastung		N-Elimination [%]	mittlerer Stromverbrauch [kWh/ EW _{BSB5/CSB} a]
			[m ³ /d]	[EW _{BSB5/CSB}]	[EW _{HN4-N}]	[%]	[%]		
Festbettanlage ARA Lyss	2002	Jan. 05 - Okt. 06	17'500	70'000	81'000	82	113	66	25
Wirbelbettanlage ARA Wohlen	2004	März 05 - Okt. 06	14'100	39'100	30'700	66	89	61	36
Membranbelebungsanlage ARA Wädenswil	Dez 05	(Jan), Juni 06 - Okt 06	9'100/2 = 4'550	30'200/2 = 15'100		89			54
Belebtschlamm-anlage Richtwert	-	-	-	10'000 - 30'000				80	25
				30'000 - 100'000				80	23

Tabelle 14: Vergleich Stromverbrauch der biologischen Reinigungsstufen

- Beim Festbettverfahren der ARA Lyss, das im Jahr 2002 in Betrieb genommen wurde, konnten nach einer Phase der betrieblichen Optimierungen in den letzten Jahren auch energetische Optimierungen umgesetzt werden. Die Anlage ist heute weitgehend energetisch optimiert.
- Das Wirbelbett der ARA Wohlen, seit 2004 in Betrieb, befand sich im Jahr 2005 noch im Prozess der betrieblichen Optimierungen. Im Jahr 2006 wurden im Rahmen dieser Untersuchungen einzelne einfach realisierbare energetische Optimierungsmassnahmen versuchsweise umgesetzt. Weitere in dieser Untersuchung formulierte Massnahmen erfordern bauliche und steuerungstechnische Anpassungen und konnten noch nicht umgesetzt werden.
- Das Membran-Belebtschlammverfahren der ARA Wädenswil ist erst seit 2005 in Betrieb. Energetische Optimierungen wurden noch nicht umgesetzt. Es ist davon auszugehen, dass der Stromverbrauch der Anlage mit laufenden Optimierungen noch gesenkt werden kann.
- Das Festbett der ARA Lyss ist mit einer Ausbaugrösse von 106'000 EW_{BSB5/CSB} bzw. der mittleren Belastung von 70'000 EW_{BSB5/CSB} die grösste Anlage. Das Membran-Belebungsverfahren der ARA Wädenswil, als kleinste Anlage, teilt sich die Ausbaugrösse von 44'000 EW_{CSB} bzw. die mittlere Belastung von 30'200 EW_{CSB} mit dem parallel laufenden konventionellen Belebtschlammverfahren.
- Betrachtet man den durchschnittlichen Belastungsgrad, hat die ARA Wohlen mit einer Auslastung von rund 66 % die schlechteren Voraussetzungen, einen geringen spezifischen Energieverbrauch zu erreichen, als die ARA Lyss, die hoch ausgelastet ist.
- Die ARA Lyss ist in der speziellen Lage, dass sie aufgrund des hohen Industrieanteils konstante Schmutzfrachten auch in der Nacht erhält und ein hoher Auslastungsgrad auch in der Nacht aufrecht erhalten werden kann.



Figur 23: Mittlere Belastung der biologischen Reinigungsanlagen während der Untersuchungsperiode



Figur 24: Auslastung und N-Elimination der biol. Reinigungsanlagen während der Untersuchungsperiode

8.2 SPEZIFISCHER STROMVERBRAUCH

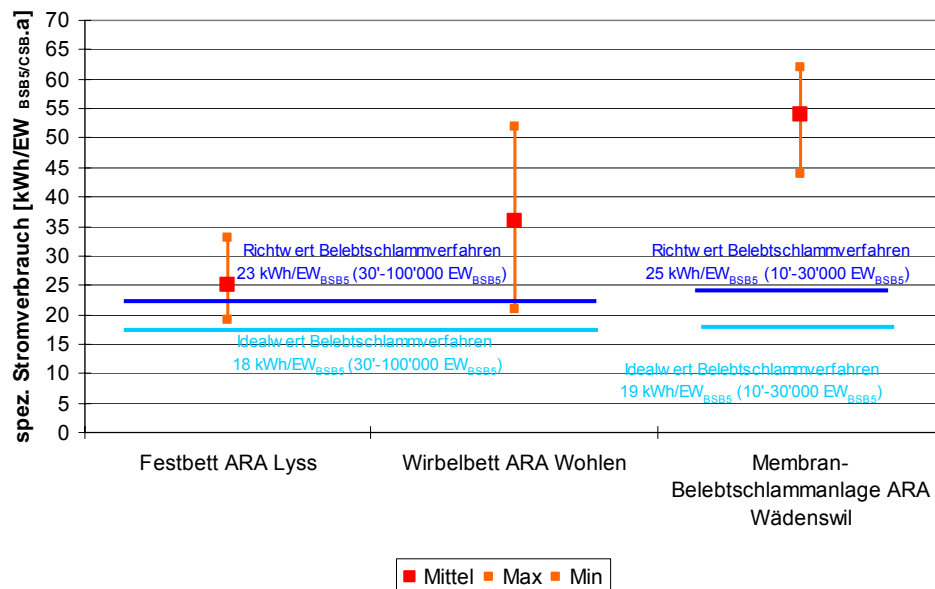
Über den Stromverbrauch von Belebtschlammanlagen liegen umfangreiche Untersuchungen vor. Im Handbuch Energie in Kläranlagen [2] liegen die Richt- und Idealwerte für verschiedene Grössenklassen von Kläranlagen für ein Belebungsverfahren vor (siehe Tab. 15).

Der Richtwert ist ein aus bestehenden Feinanalysen und einer Bestandesaufnahme an Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen abgeleiteter Wert, der bei bestehenden Anlagen realistisch erreicht werden kann. Der Idealwert wurde aufgrund theoretischer Berechnungen anhand einer Modellanlage ermittelt. Er kann unter optimalen Voraussetzungen erreicht werden.

Elektrizitätsverbrauch Belegung pro aktuelle EW_{BSB5}	Kläranlagengrösse (aktuelle EW_{BSB5})							
	5'000-10'000		10'000-30'000		30'000-100'000		>100'000	
	Richt- wert	Ideal- wert	Richt- wert	Ideal- wert	Richt- wert	Ideal- wert	Richt- wert	Ideal- wert
C-Abbau + Nitrifikation + Denitrifikation (80%) (Schlammalter 14 Tage)	29	22	25	19	23	18	21	16

Tabelle 15: Energetische Beurteilungskriterien (Richt- und Idealwerte) für ein konventionelles Belebungsverfahren (Belüftung / Gebläse inkl. Umwälzung, Rezirkulation, Rücklaufschlamm) gemäss Handbuch Energie in Kläranlagen [2]

Grundsätzlich können aufgrund der vorliegenden Studie nur Aussagen gemacht werden über den Stromverbrauch der drei untersuchten Anlagen. Inwiefern der Stromverbrauch der ARA Lyss typisch ist für die Festbetttechnologie oder der Stromverbrauch der ARA Wohlen für die Wirbelbetttechnologie, kann mit der vorliegenden Untersuchung nicht beurteilt werden.



Figur 25: Vergleich spezifischer Stromverbrauch der biologischen Reinigungsanlagen

Der mittlere spezifische Stromverbrauch des Festbetts der ARA Lyss beträgt in der Untersuchungsperiode 25 kWh/EW_{BSB5/CSB.a} (siehe Fig. 25 und Tab. 14). Mit hoher spezifischer Auslastung unterschreitet das Festbett den Richtwert einer konventionellen Belebtschlammanlage und erreicht Werte von 20 kWh/EW_{BSB5/CSB.a}. Aufgrund der Abwasserzusammensetzung neigt das untersuchte Festbettverfahren zeitweise zu einer raschen Verstopfung. In diesen Perioden muss die Belüftung umgestellt werden, was mit einem erheblichen Anstieg des spezifischen Stromverbrauches verbunden ist. Auffallend ist der enge Bereich des spezifischen Stromverbrauches. Werte über 30 kWh/EW_{BSB5/CSB.a} werden nur selten überschritten. Dies kann mit dem modularen Aufbau des Festbettes erklärt werden. Weil das Festbett konzeptionell so angelegt wurde, dass die Anzahl in Betrieb stehender Festbettzellen automatisch aufgrund der Belastung verändert wird, ist ein belastungsgerechter Betrieb möglich,

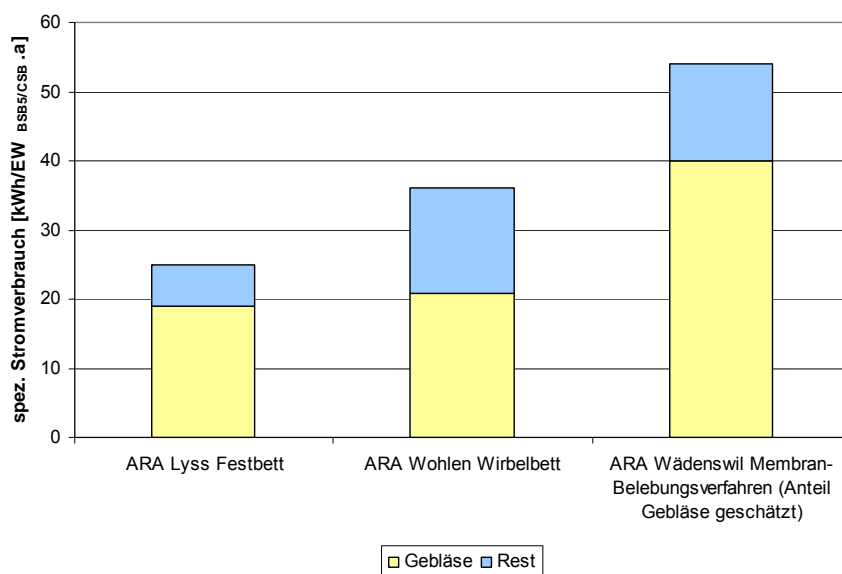
das heisst, die Anlage kann ihre Kapazität laufend der aktuellen Belastung anpassen (Standby-Schaltungen) und somit den Auslastungsgrad hoch halten.

Dies ist bei der ARA Wohlen nicht möglich und die Anlage weist deshalb mit verändernden Belastungswerten einen stark schwankenden spezifischen Stromverbrauch auf. Der mittlere spezifische Stromverbrauch des Wirbelbettverfahrens beträgt in der gesamten Betrachtungsperiode im Durchschnitt 36 kWh/EW_{BSB5/CSB}.a. Er liegt damit rund 50 % über dem Richtwert einer Belebtschlammanlage von 23 kWh/EW_{BSB5}.a (30'000 bis 100'000 EW_{BSB5}). In Zeiten höherer Auslastung der Anlage (46'600 EW_{BSB5/CSB}) liegt er bei 29 kWh/EW_{BSB5/CSB}.a, in Zeiten geringerer Belastung (31'800 EW_{BSB5/CSB}) bei 42 kWh/EW_{BSB5/CSB}.a. Es liegt eine hohe Spannweite und eine starke Abhängigkeit vom Auslastungsgrad der Anlage vor. Im Zeitraum Februar bis April 2006, bei hoher Kohlenstoffbelastung, waren gar Werte gegen 20 kWh/EW_{BSB5/CSB}.a möglich.

Der spezifische Energieverbrauch beträgt für das Membran-Belebungsverfahren auf der ARA Wädenswil in der gesamten Betrachtungsperiode im Durchschnitt 54 kWh/EW_{CSB}.a. Er liegt damit deutlich über dem Richtwert einer Belebtschlammanlage von 25 kWh/EW_{BSB5} (10'000 bis 30'000 EW_{BSB5}). Zeitweise (Juli, August 2006) konnte ein minimaler Wert von 45 kWh/EW_{CSB}.a erreicht werden.

Die konventionelle Belebtschlammanlage der ARA Wädenswil (Strasse 1 und 2) erreicht im Durchschnitt Werte von 31 kWh/EW_{BSB5}.a. Im August 2006 wurde ein Wert knapp unter dem Richtwert ermittelt.

Nachfolgende Figur 26 zeigt den Anteil der Gebläse am spezifischen Energieverbrauch der biologischen Reinigungsstufen der ARA Lyss, Wohlen und Wädenswil.



Figur 26: Anteil der Gebläse am spezifischen Stromverbrauch der biologischen Reinigungsstufe

In Bezug auf die drei untersuchten Kläranlagen ergeben sich nachfolgende Erkenntnisse:

1. Der spezifische Stromverbrauch der Anlagen ist schwankend. Bei der ARA Lyss und bei der ARA Wohlen bedeutet eine Erhöhung der Schmutzstoffbelastung und somit des Auslastungsgrades eine Senkung des spezifischen Energieverbrauches. Dieser Effekt ist bei der ARA Wädenswil auch zu erwarten, konnte aber mit der relativ kurzen Messreihe Juni bis Oktober 2006 nicht eindeutig belegt werden.
2. Um einen geringen spezifischen Stromverbrauch zu erreichen, müssen die Anlagen mit hohem spezifischem Auslastungsgrad der Verfahrenseinheiten betrieben werden können (Volllast statt Teillast). Dies ist bei der ARA Lyss aufgrund des autonomen Betriebs der einzelnen Zellen der Fall.
3. Die minimalen, spezifischen Stromverbrauchswerte der ARA Lyss und der ARA Wohlen deuten darauf hin, dass bei hoher Auslastung und optimierten Betrieb Verbrauchswerte einer konventionellen Belebtschlammanlage erreicht werden können.
4. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Membran-Belebungsverfahren der ARA Wädenswil energetisch noch optimiert und somit der spezifische Stromverbrauch mit steigender betrieblicher Erfahrung gesenkt werden kann. Es ist jedoch fraglich, ob dieses Verfahren die minimalen Werte der Festbettanlage oder der Wirbelbettanlage oder den Richtwert einer konventionellen Belebtschlammanlage erreichen kann, weil der Gebläseeinsatz in diesem Verfahren überdurchschnittlich hoch ist.
5. Der massgebliche Stromverbraucher der biologischen Reinigungsstufe ist die Gebläsestation. Neben der Funktion der Sauerstoffversorgung für die Mikroorganismen, erfüllen die Gebläse bei den neuen untersuchten Verfahren auch den Zweck, eine genügend grosse Turbulenz zu erzeugen, um die Biomasse aus dem System austragen zu können. Der Stromverbrauch ist daher naturgemäss in der Tendenz höher (siehe Fig. 26).

9. Schlussfolgerungen

1. Stromverbrauchsmessungen auf Kläranlagen haben für den Betreiber bisher einen geringen Stellenwert. Die Stromverbrauchserfassungen sind oft fehlerhaft.
2. Kläranlagen haben die Priorität, die gesetzlich vorgeschriebene Qualität des gereinigten Abwassers zu erreichen. Die Minimierung des Stromverbrauches hat oft eine kleine Priorität, da keine verbindlichen Vorschriften bestehen.
3. Der Hauptstromverbraucher der biologischen Reinigungsstufe ist die Gebläsestation. Neben der Funktion der Sauerstoffversorgung für die Mikroorganismen, erfüllen die Gebläse bei den neueren Verfahren auch den Zweck, eine genügend grosse Turbulenz zu erzeugen, um die Biomasse aus dem System austragen zu können.
4. Die neueren biologischen Reinigungsverfahren weisen bei geringerem Platzbedarf und besserer Qualität des gereinigten Abwassers (Membran-Belebungsverfahren) tendenziell einen höheren Stromverbrauch auf als das konventionelle Belebtschlammverfahren.
5. Massgebend für einen optimalen spezifischen Stromverbrauch (Stromverbrauch bezogen auf die Belastung) der biologischen Reinigungsstufen ist eine gute Auslastung der Anlage bzw. die Vermeidung von Teillastbetrieb der Verfahrenseinheiten.

10. Stromverbrauchsentwicklung und Einsparpotenzial

Die rund 900 Kläranlagen der Schweiz wiesen im Jahr 2001 einen Stromverbrauch von ca. 430 GWh/a auf (Schweizerische Statistik erneuerbarer Energien [6]). Der Anteil der biologischen Reinigungsstufe betrug ca. 260 GWh/a.

Aufgrund steigender Anforderungen an die Qualität des gereinigten Abwassers wird der Stromverbrauch auf Kläranlagen weiter ansteigen. Wegen beschränktem Platzangebot dürfte das heute am meisten angewendete Belebtschlammverfahren zunehmend durch neuere Verfahren ersetzt werden, welche einen höheren Stromverbrauch aufweisen.

Da der Stromverbrauch vieler Kläranlagen mangels verbindlicher Vorschriften nicht optimiert ist, gehen wir von einem Einsparpotenzial von ca. 20 % aus. Das Ausschöpfen dieses Potenzials setzt voraus, dass dem Stromverbrauch derselbe Stellenwert zukommt, wie das Einhalten der Qualität des gereinigten Abwassers.

Tabelle 16 enthält eine Prognose der künftigen Entwicklung der Anwendung der biologischen Reinigungsverfahren und deren Stromverbrauch. Unter der Annahme, dass das geschätzte Einsparpotenzial von 20 % realisiert wird, kann der Stromverbrauch der biologischen Reinigungsstufe auf dem Niveau 2001 gehalten werden.

		Belebtschlammverfahren		Festbettverfahren		Wirbelbettverfahren		Membran-Belebtschlammverfahren		Total biologische Reinigungsverfahren	
		Anteil an EW Schweiz	Stromverbrauch	Anteil an EW Schweiz	Stromverbrauch	Anteil an EW Schweiz	Stromverbrauch	Anteil an EW Schweiz	Stromverbrauch	Anteil an EW Schweiz	Stromverbrauch
Statistik BUWAL 2001 [6]	spez. Energieverbrauch		22 kWh/EW.a		24 kWh/EW.a		26 kWh/EW.a		44 kWh/EW.a		
		95%	245 GWh/a	5%	15 GWh/a	0%	0 GWh/a	0%	0 GWh/a	100%	260 GWh/a
Prognose 2030	keine Energieoptimierung										
		35%	90 GWh/a	25%	75 GWh/a	15%	45 GWh/a	25%	130 GWh/a	100%	340 GWh/a
	mit Energieopt. (Potenzial in %)		20%		20%		20%		20%		
		35%	70 GWh/a	25%	60 GWh/a	15%	35 GWh/a	25%	105 GWh/a	100%	270 GWh/a

Tabelle 16: Prognose des Anteils der biol. Reinigungsverfahren und deren Stromverbrauch in der Schweiz

11. Empfehlungen

11.1 PLANUNG UND BETRIEB KLÄRANLAGE

- | | | |
|---|--|--|
| 1 | Qualitätssicherung der Stromverbrauchserfassung | Stromverbrauchsmessungen müssen periodisch auf Plausibilität überprüft werden. Diese Überprüfung muss Bestandteil einer periodischen Qualitätssicherung sein. |
| 2 | Konzept Stromverbrauchserfassung | <p>Stromsparmassnahmen setzen die Kenntnis über den Stromverbrauch der massgebenden Aggregate und die Einflussfaktoren voraus. Vielfach fehlt diese Kenntnis, weil die nötigen Daten oder Messgeräte nicht vorhanden sind.</p> <p>Die systematische Erfassung des Stromverbrauches nach Funktion (Vorreinigung, biologische Reinigungsstufe, Schlammbehandlung, übriges) sowie die einzelne Erfassung grosser Stromverbraucher (z.B. Leistung >20 kW) ist im Prozess der Stromverbrauchsoptimierung Voraussetzung. Dies setzt ein Konzept zur Stromverbrauchserfassung voraus. Dieses Konzept sollte in Zukunft für jede ARA vorliegen.</p> |
| 3 | Automatischer Teilbetrieb | Um den Auslastungsgrad hoch zu halten, müssen biologische Reinigungsanlagen in Zeiten schwacher Auslastung möglichst automatisch partiell oder intermittierend betreibbar sein. Dies setzt bestimmte bauliche Voraussetzungen und einen bestimmten Automatisierungsgrad in der Steuerung und Regelung voraus. Diese müssen bereits in der Konzeption von Anlagen berücksichtigt werden. |
| 4 | Spez. Stromverbrauch werkvertraglich vereinbaren | Bei der Submission von biologischen Reinigungsverfahren ist von den Lieferanten der spez. Stromverbrauch anzugeben. Dieser ist als Garantiewert in den Werkvertrag aufzunehmen. |
| 5 | Durchführen Stromverbrauchsanalyse | Kläranlagen sollen verpflichtet werden, Stromverbrauchsanalysen durchzuführen, wenn der spezifische Energieverbrauch der Anlage die geltenden Richtwerte um ein zu definierendes Mass überschreitet (siehe auch UBA-Forschungsprojekt [7]). |

11.2 WEITERE FORSCHUNGSPROJEKTE

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | Weitere Erhebung von Stromverbrauchsdaten | Untersuchungen zum Stromverbrauch von Festbett-, Wirbelbett- und Membran-Belebungsanlagen sollen auf weiteren ARA gemacht werden, so dass in Zukunft auch Aussagen über den Stromverbrauch von verschiedenen Typen von Festbett-, Wirbelbett- und Membran-Belebungsanlagen gemacht werden können. Aufgrund dieser Untersuchungen sollen Richt- und Idealwerte für die neuen Verfahren formuliert werden. |
| 2 | Versuch partieller oder intermittierender Betrieb | Über den intermittierenden oder partiellen Betrieb von Wirbelbett- und Membran-Belebungsverfahren liegen heute wenige Erfahrungen vor. Es wird vorgeschlagen, am Beispiel einer geeigneten Kläranlage anhand von Versuchen Erfahrungen über den intermittierenden oder partiellen Betrieb biologischen Reinigungsverfahren zu sammeln. |

Die Verfasser dieser Untersuchung danken den Betriebsleitern und Verantwortlichen der ARA Lyss, der ARA Wohlen und der ARA Wädenswil für die Unterstützung und für die zahlreichen Eigenleistungen, die sie dieser Untersuchung zur Verfügung gestellt haben.

Die vorliegende Studie wurde ausserdem durch EnergieSchweiz in Infrastrukturanlagen (Programm für Energieeffizienz und erneuerbare Energien) unterstützt.

Abkürzungsverzeichnis

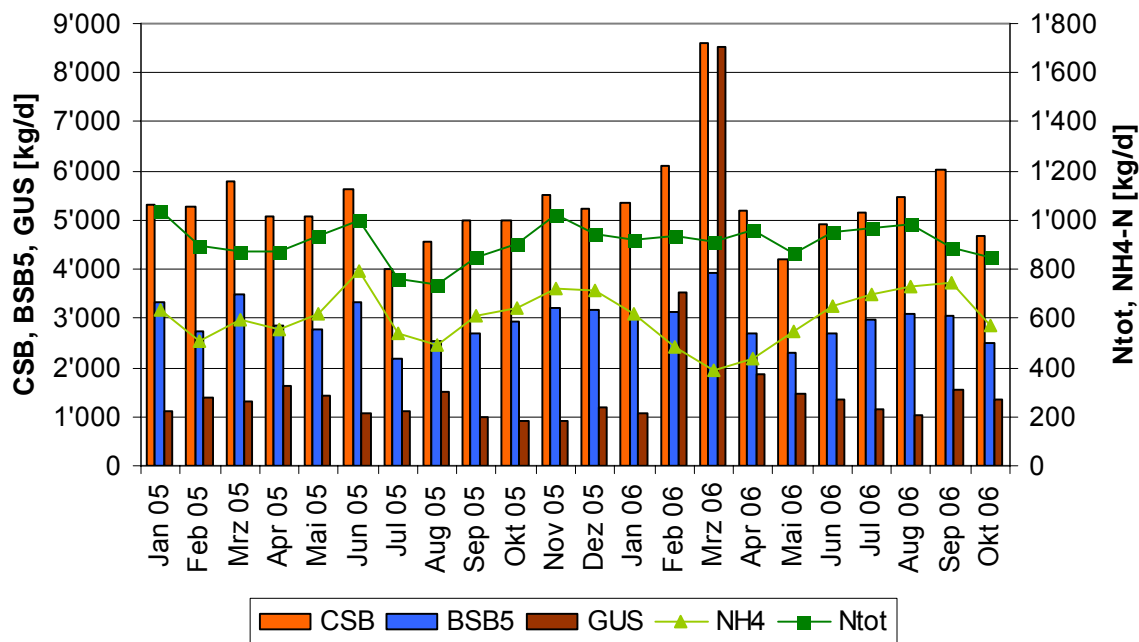
ARA	Abwasserreinigungsanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSB ₅	biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff
EW	Einwohnerwerte
GUS	gesamte ungelöste Stoffe
NRW	Nordrhein-Westfalen
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff
TS	Trockensubstanz
VSA	Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute

Literaturverzeichnis

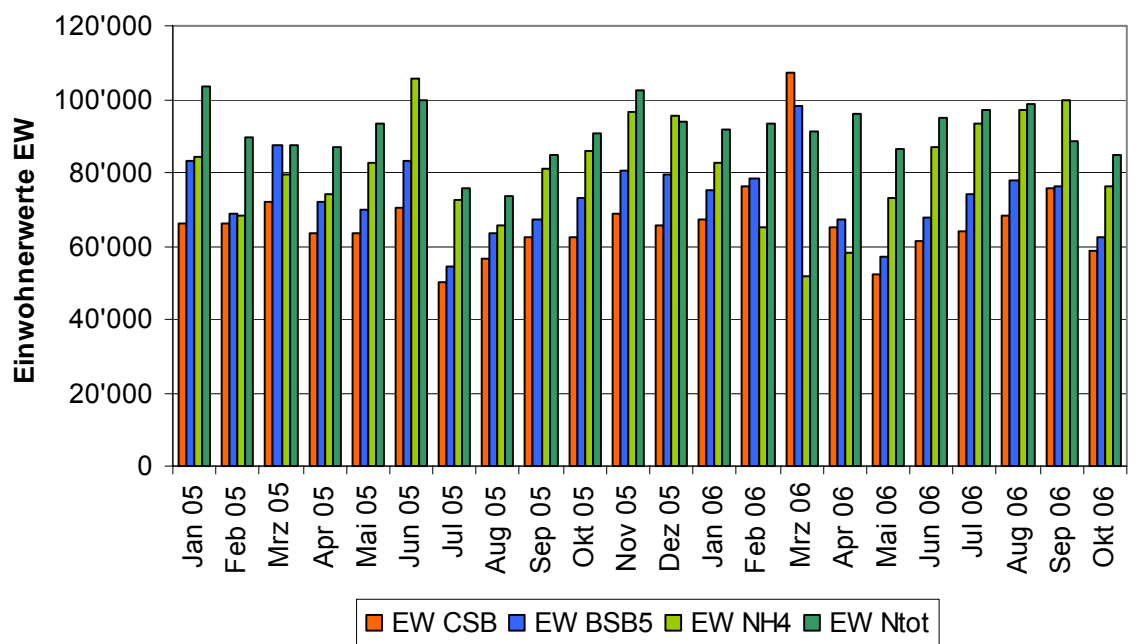
- [1] Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Bundesamt für Konjunkturfragen (BfK), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): **Energie in ARA, Handbuch**, 1994. EDMZ, 3000 Bern.
- [2] Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen: **Energie in Kläranlagen, Handbuch**, September 1999.
- [3] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: **Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen, Handbuch Wasser 4**, 1. Auflage, Karlsruhe 1998
- [4] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: **Abwassertechnik mit Membrantechnik. Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich**, 1. Auflage 2003.
- [5] Bundesamt für Energie (BFE): **Energie in Wasserversorgungen, Handbuch**, 2004.
- [6] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): **Schweizerische Statistik erneuerbarer Energien**, 2003.

Anhang A

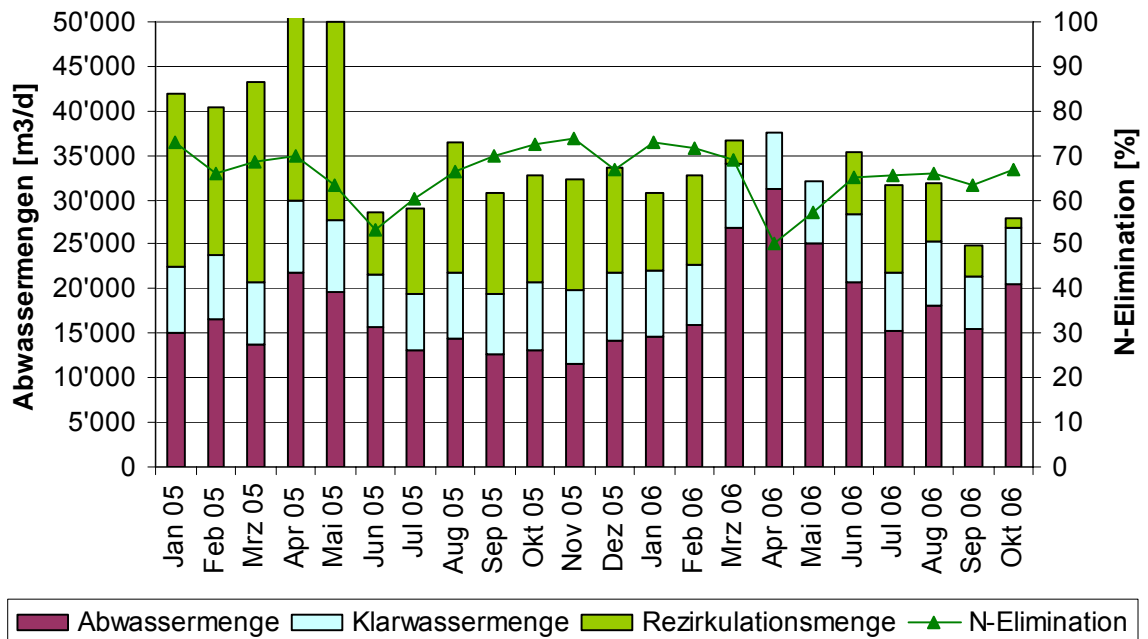
Anhang A1
ARA Lyss: Fracht Festbetтанlage



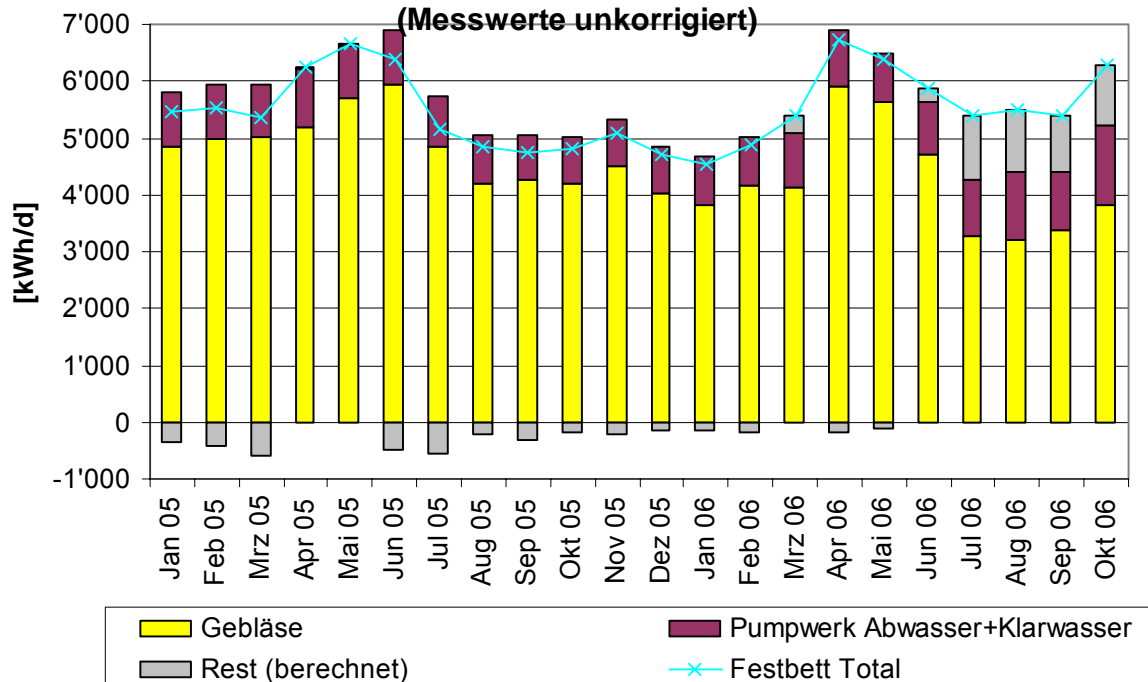
Anhang A2
ARA Lyss: Belastung Festbetтанlage

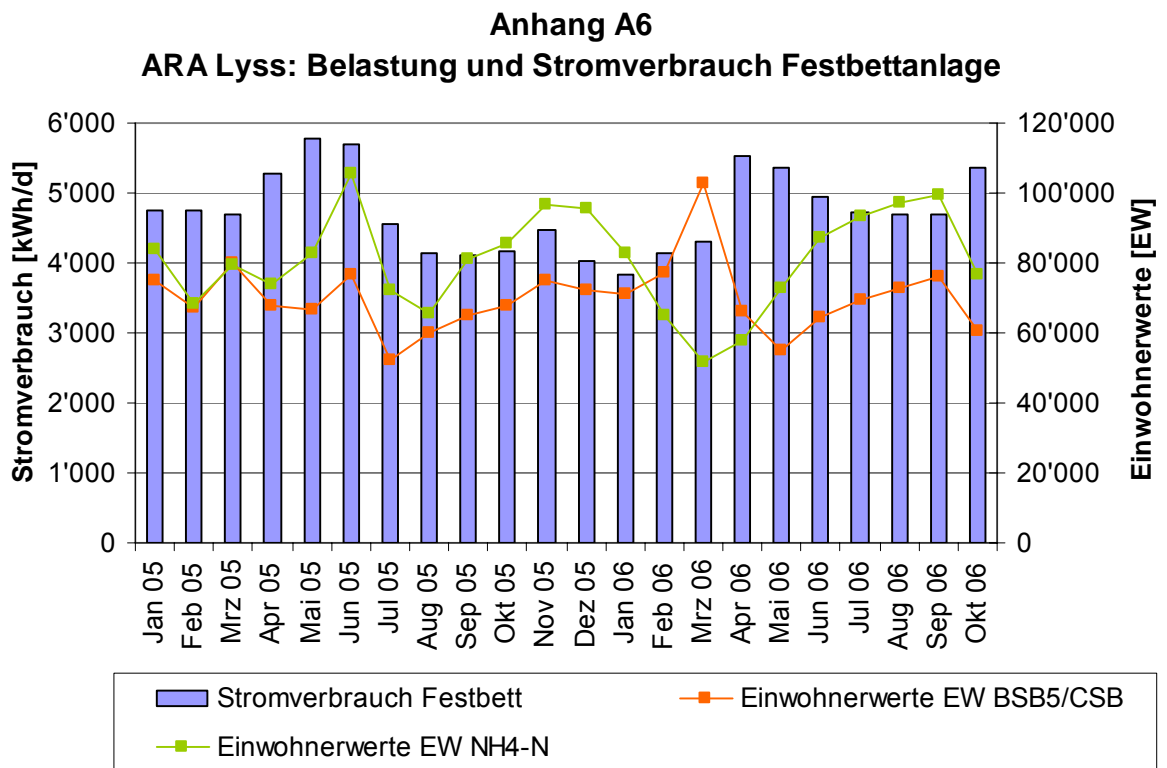
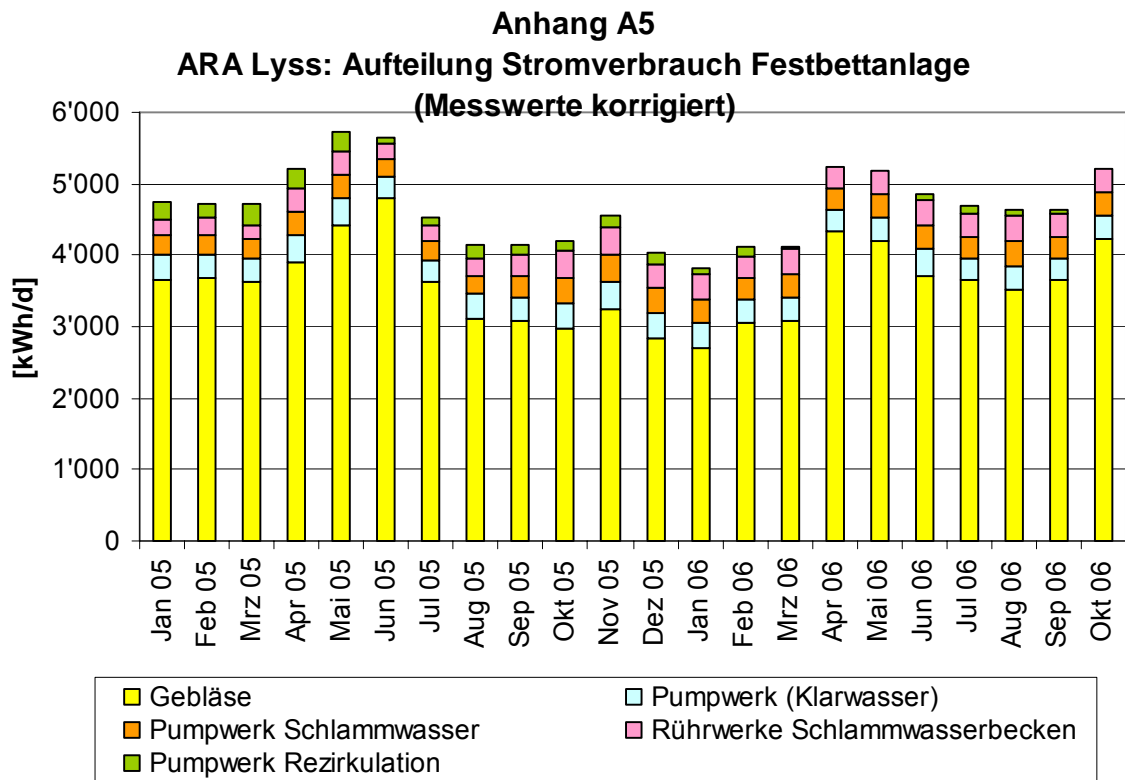


Anhang A3 ARA Lyss: Abwassermengen und N-Elimination Festbettanlage



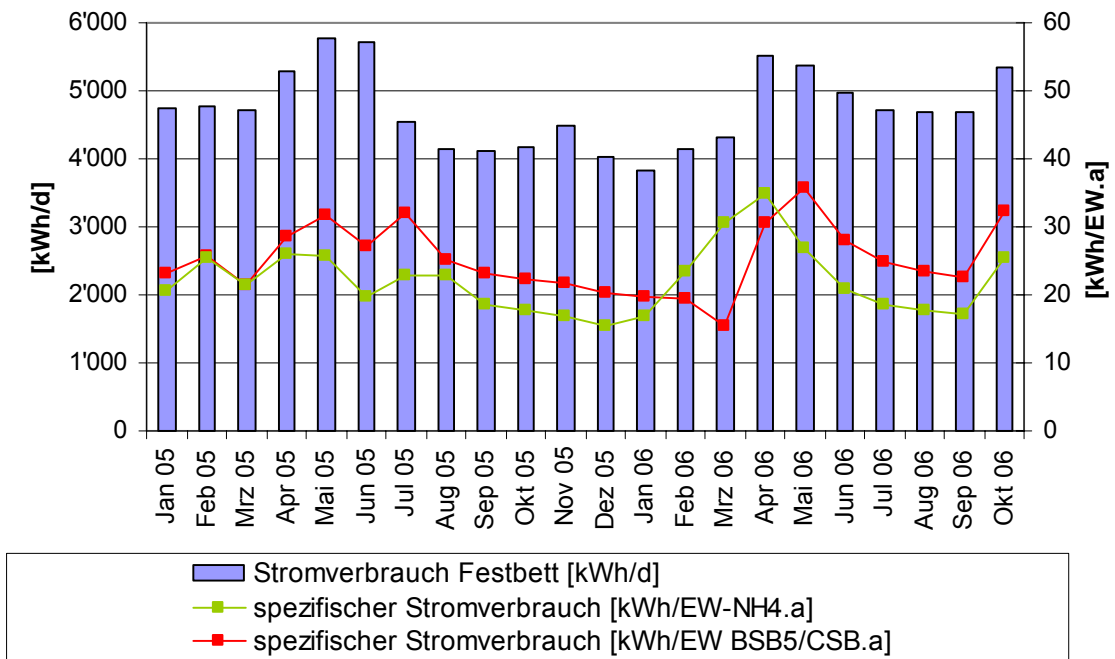
Anhang A4 ARA Lyss: Aufteilung Stromverbrauch Festbettanlage (Messwerte unkorrigiert)





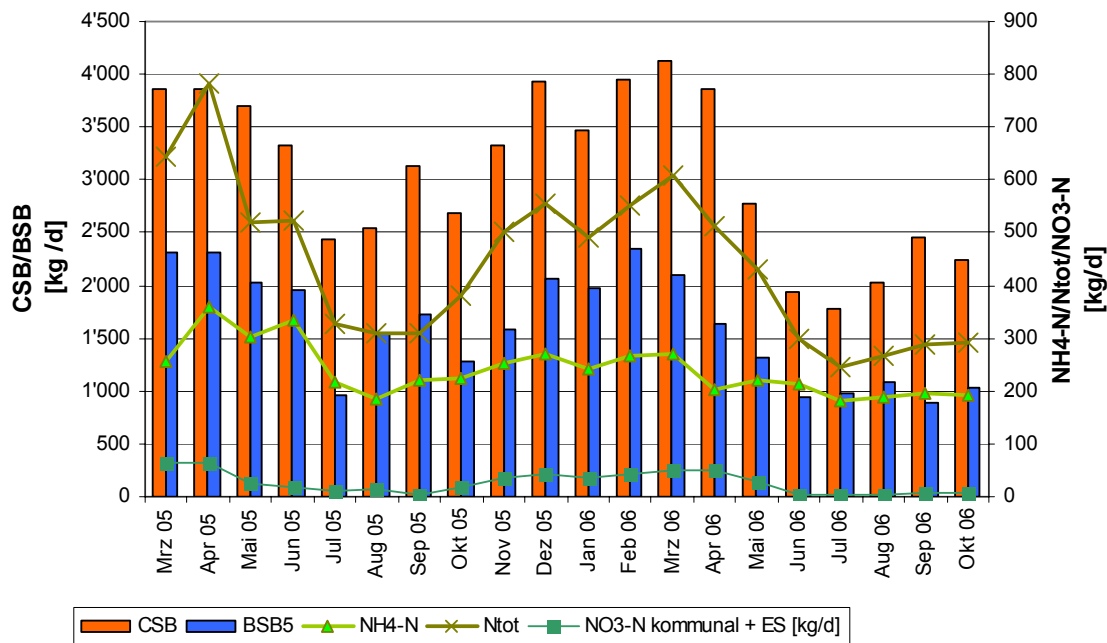
Anhang A7

ARA Lyss: spez. Stromverbrauch Festbettanlage

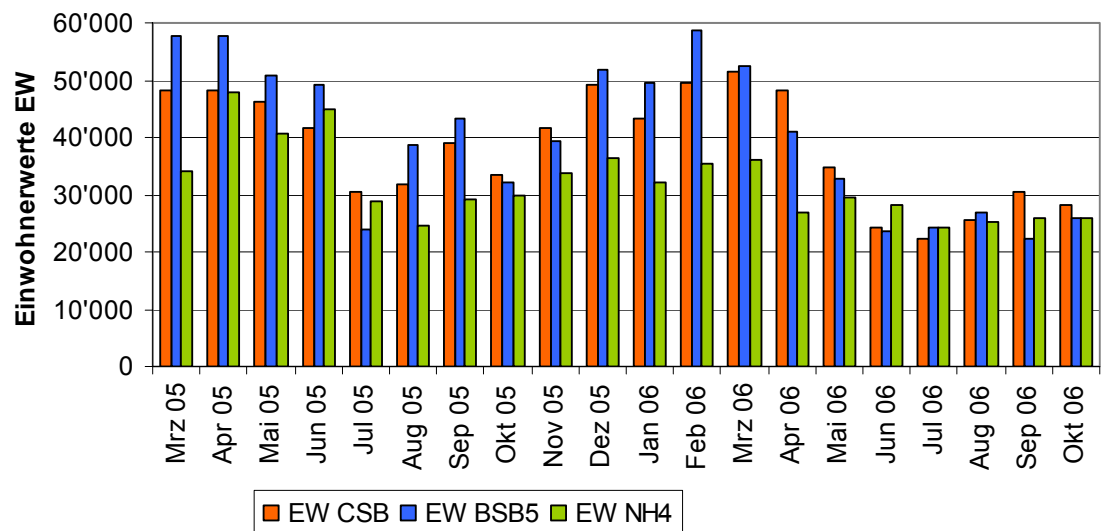


Anhang B

Anhang B1
ARA Wohlen: Fracht Wirbelbettanlage

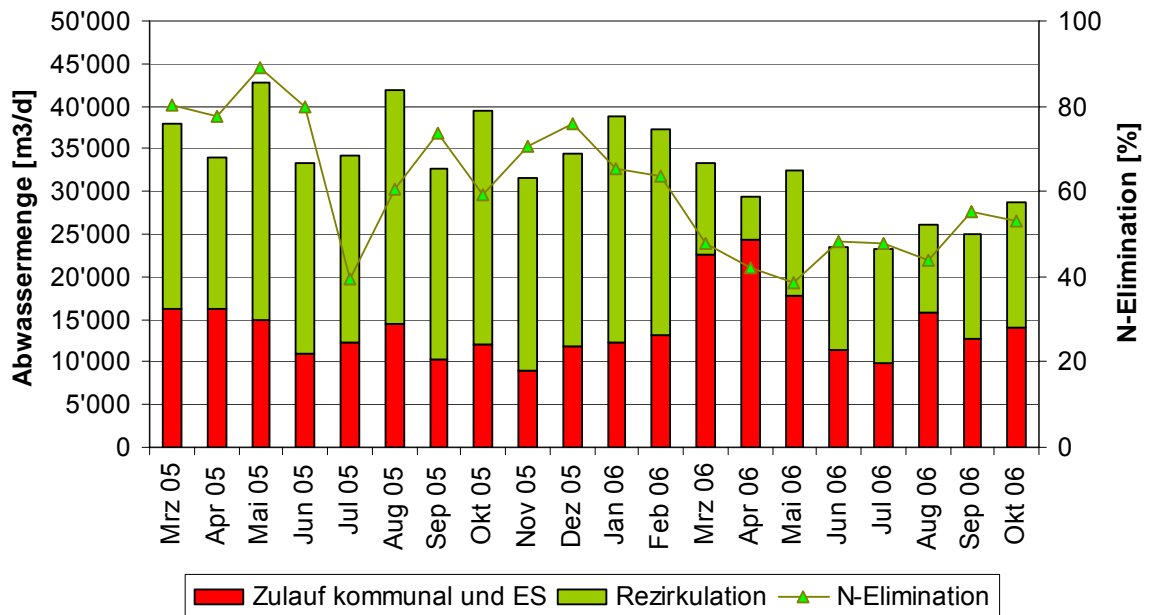


Anhang B2
ARA Wohlen: Belastung Wirbelbettanlage



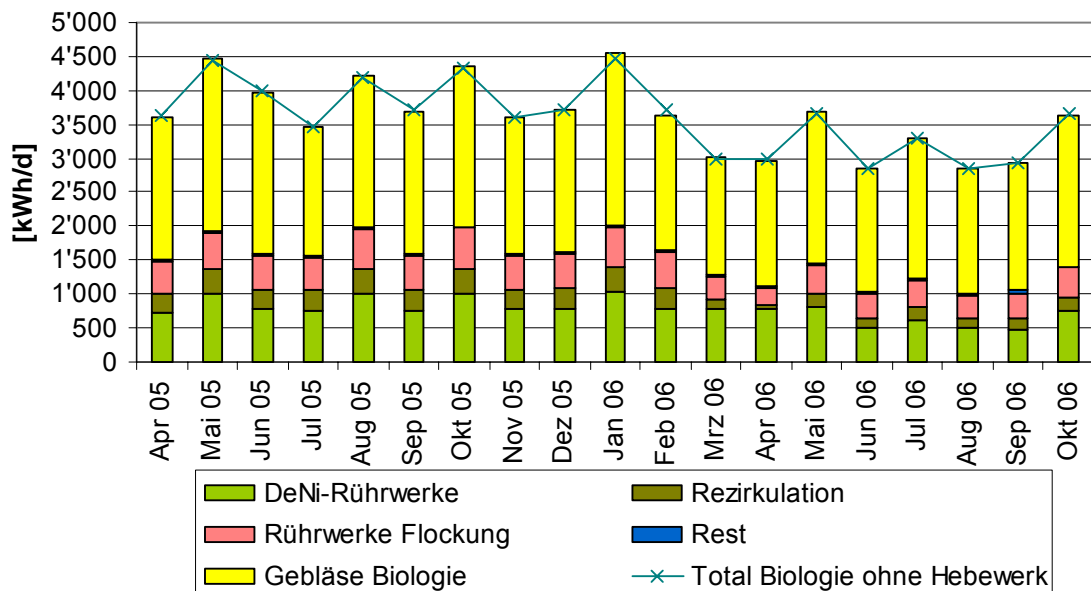
Anhang B3

ARA Wohlen: Abwassermengen und N-Elimination Festbettanlage

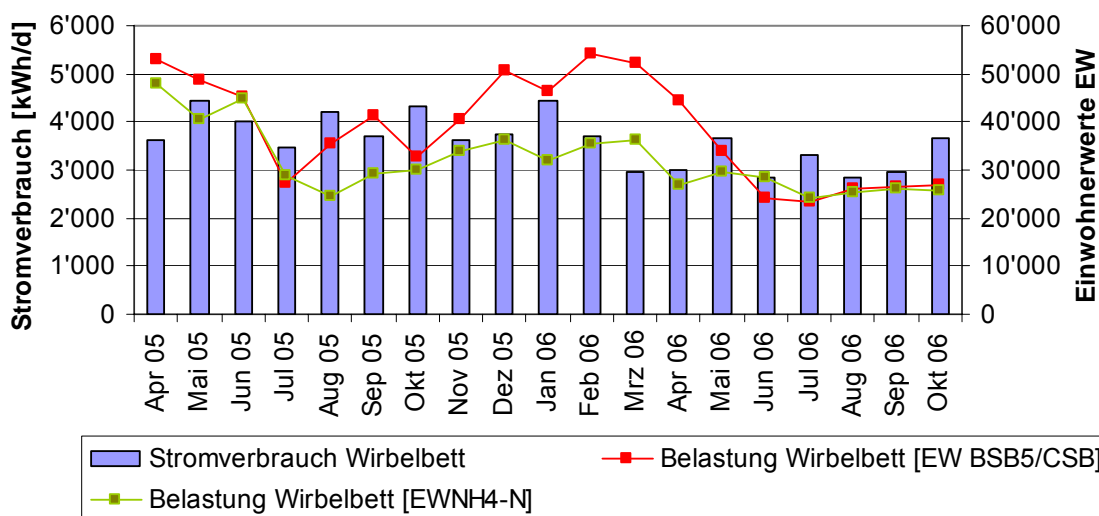


Anhang B4

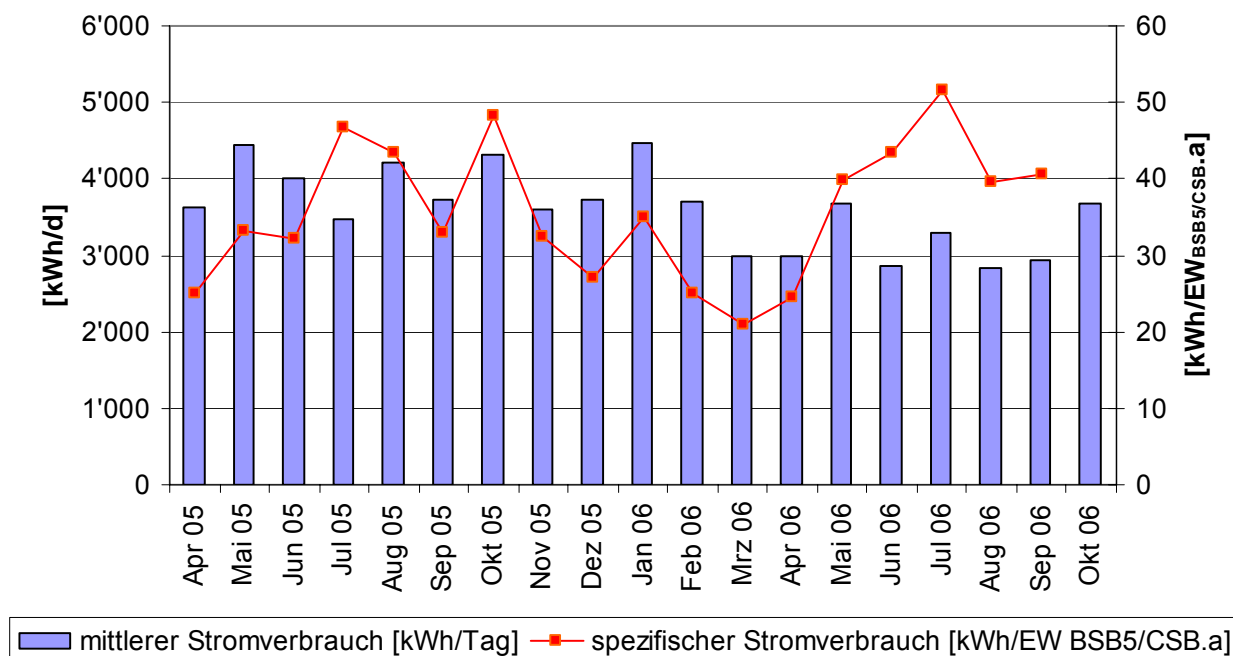
ARA Wohlen: Aufteilung Stromverbrauch Wirbelbettanlage



Anhang B5: ARA Wohlen: Belastung und Stromverbrauch Wirbelbettanlage

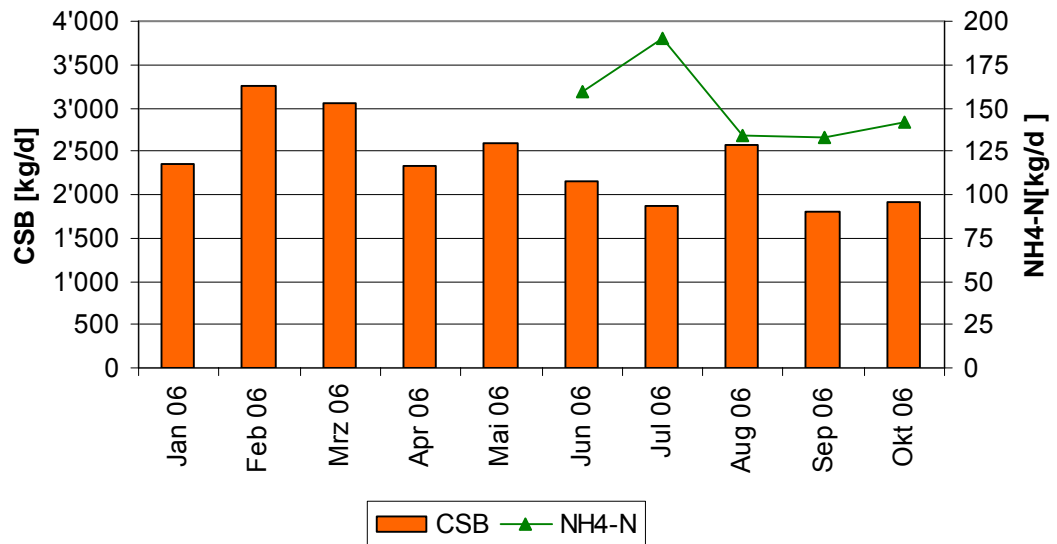


Anhang B6 ARA Wohlen: Spezifischer Stromverbrauch Wirbelbettanlage

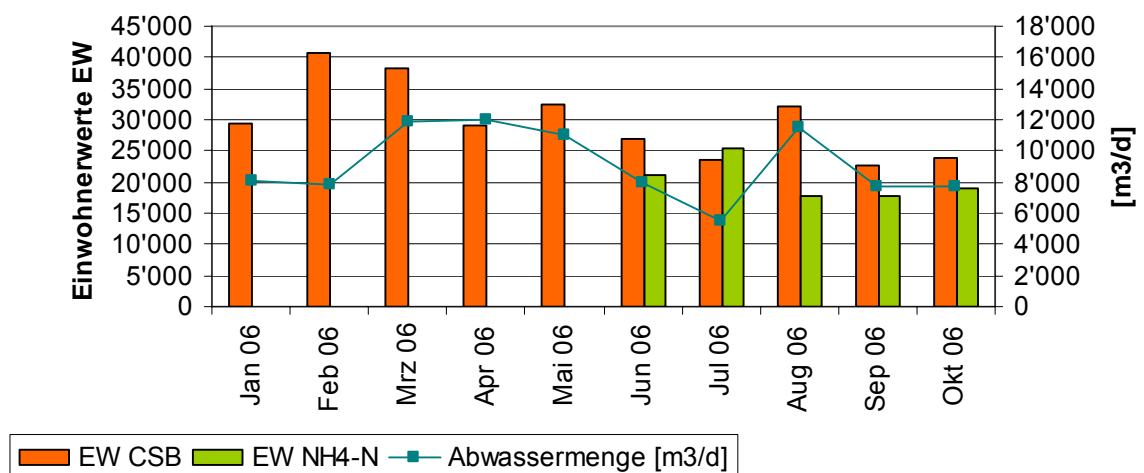


Anhang C

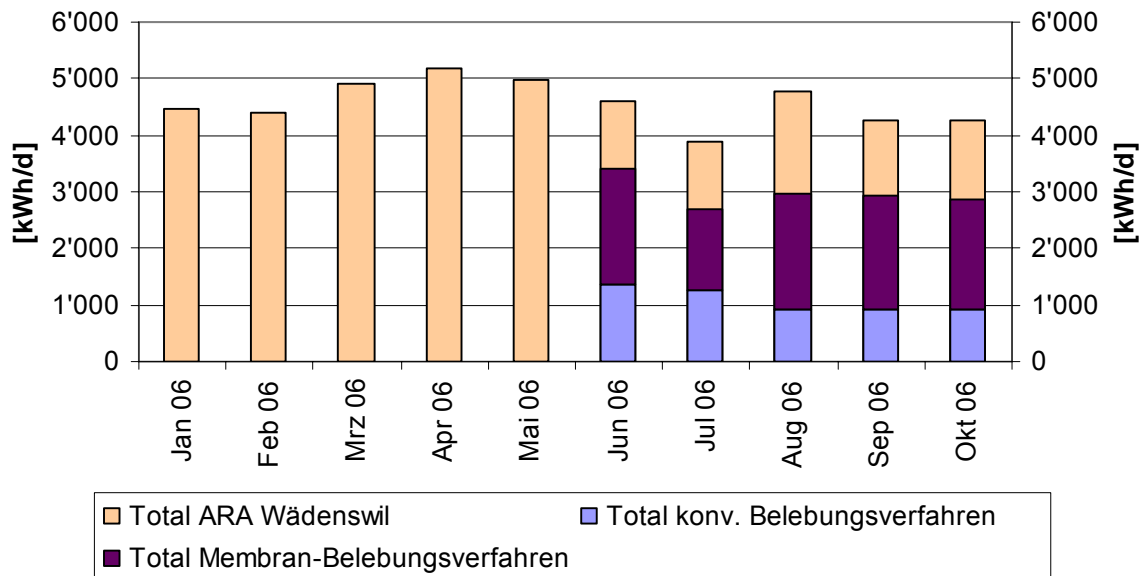
Anhang C1 ARA Wädenswil: Fracht Biologie



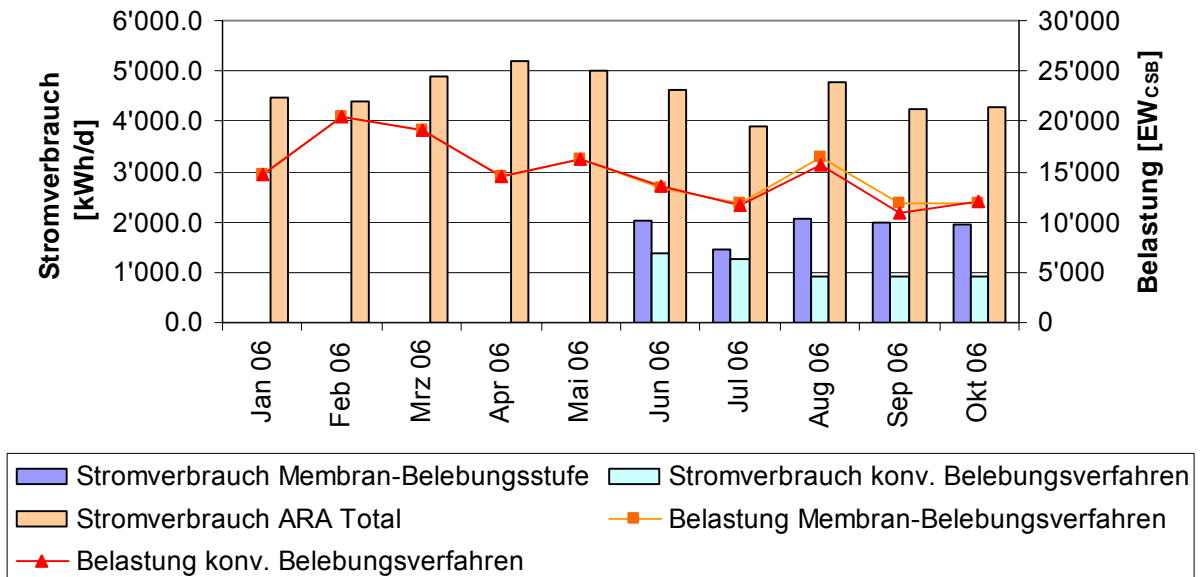
Anhang C2 ARA Wädenswil: Belastung Biologie



Anhang C3
ARA Wädenswil:
Aufteilung Stromverbrauch konv. Biologie - Membranbiologie



Anhang C4
ARA Wädenswil:
Belastung und Stromverbrauch Membranbiologie



Anhang C5

ARA Wädenswil: Spezifischer Stromverbrauch Membrananlage

