

# Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 305

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are thick and have a slight white outline, giving it a three-dimensional appearance. The 'b' and 'a' are connected, and the 's' and 't' are also connected. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

# Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen

von

Matthias Hartmann  
Jörg Londong

Bauhaus-Universität Weimar  
Professur Siedlungswasserwirtschaft

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 305

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen  
veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse  
in der Schriftenreihe **Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe  
besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter  
dem Namen der Verfasser veröffentlichten  
Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des  
Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe,  
auch auszugsweise, nur mit Genehmigung  
der Bundesanstalt für Straßenwesen,  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen** können  
direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH,  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen,  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre  
Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im  
Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet.  
Dieser Dienst wird kostenlos angeboten;  
Interessenten wenden sich bitte an die  
Bundesanstalt für Straßenwesen,  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)**  
zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen  
BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt: FE 02.0325/2011/HRB**  
Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen

**Fachbetreuung**  
Hermann Wirtz

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-381-7

Bergisch Gladbach, Juli 2018

## Kurzfassung – Abstract

### **Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen**

Die spezifische Charakteristik der an PWC-Anlagen anfallenden Abwässer (viel Urin und hoher Anteil von Toilettenpapier und Grobstoffen im Abwassergemisch), deren Ursache (Nutzerverhalten, sparsame Sanitärtechnik) und schließlich die Konsequenzen (Betriebsstörungen durch Verstopfungen und Ablagerungen, Schwierigkeiten bei der biologischen Behandlung und Schlammabfuhr) erfordern angepasste Konzepte und Technologien für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb der Abwasserentsorgung von PWC-Anlagen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens FE 02.202/2000/MRB wurde die Planung und Umsetzung der abwassertechnischen Sanierung der PWC Anlage Jalmer Moor an der BAB A7 wissenschaftlich begleitet sowie der Betrieb evaluiert.

Einerseits wurde Augenmerk auf den wirksamen Rückhalt von Feststoffen in einer Vorklärung gelegt, der speziell für die Betriebssicherheit von Bodenfiltern entscheidend ist. Andererseits wurde die Abtrennung von männlichem Urin aus dem Abwassergemisch als mögliche Option zur Stabilisierung des Reinigungsprozesses untersucht.

Im Projekt konnten konstruktive Empfehlungen für die Absetzbehälter von PWC-Anlagen abgeleitet werden und gezeigt werden, dass sich Bogensiebe als Alternative zu Absetzbecken auf Grund zu erwartender betrieblicher Probleme nicht eignen.

Die Untersuchungen zur Urinabtrennung zeigten, dass diese einen signifikanten Beitrag zur Sicherstellung von Ablaufgrenzwerten und insbesondere zur Stabilisierung der Nitrifikation im Bodenfilter leisten kann. Urinabtrennung allein ist kein Garant für das Einhalten von Ablaufgrenzwerten. Wichtig ist der ordnungsgemäße Betrieb der Gesamtanlage, der solide Fachkunde erfordert und deshalb bevorzugt an eine geeignete Institution/Firma übergeben werden sollte. Auf tägliche Kontrollgänge, wie sie prinzipiell von geschultem bzw. eingewiesenem Personal der Autobahnmeisterei zu leisten wäre, kann letztlich nicht verzichtet werden. Der zeitliche Aufwand dafür lässt sich nur durch eine geeignete konstruktive Gestaltung der Anlage in Grenzen hal-

ten. Bei der Planung zukünftiger Anlagen müssen deshalb die Belange des späteren Betreibers wesentlich stärker Berücksichtigung finden.

### **Pilot application of a system for treatment of sewage from PWC parking areas**

The specific characteristics of sewage generated by the PWC parking areas (a lot of urine and a high proportion of toilet paper and coarse particles in the sewage), the cause of this (user behaviour, water saving sanitation facilities) and the consequences (disturbances of operation by clogging, difficulties in biological treatment and sludge removal) require adapted concepts and technologies for the economical and safe operation of wastewater disposal.

Based on the findings of the research project FE 02.202 / 2000 / MRB, the design and implementation of the wastewater treatment system of the PWC Jalmer Moor at the BAB A7 was scientifically supported and the concept and the operation were evaluated.

On the one hand, attention was focused on the effective retention of solids in a primary clarifier, which is particularly important for the operational safety of sand filters. On the other hand, the separation of male urine from the wastewater mixture was investigated as a possible option for stabilizing the purification process.

In the project, it was possible to derive constructive recommendations for the settling tanks of PWC plants and to show that curved screens as an alternative to settling tanks are not suitable due to operational problems.

The investigations on urine separation showed that separation could make a significant contribution to the safeguarding of effluent limits and in particular to the stabilization of nitrification in the soil filter. Urine separation alone is not a guarantor for compliance with limit values. Important is the proper operation of the entire system, which requires a firm specialist and therefore should preferably be handed over to a suitable institution / company. Day-to-day inspections, such as would normally be required by trained or educated staff, cannot be

dispensed with. The time required for this can only be limited by a suitable structural design of the plant. The design of future plants must take into account the interests of the subsequent operator.

## Summary

### Pilot application of a system for treatment of sewage from PWC parking areas

#### 1 Objective

The specific characteristics of sewage generated by the PWC parking areas (a lot of urine and a high proportion of toilet paper and coarse particles in the sewage), the cause of this (user behaviour, water saving sanitation facilities) and the consequences (disturbances of operation by clogging, difficulties in biological treatment and sludge removal) require adapted concepts and technologies for the economical and safe operation of wastewater disposal.

On behalf of the Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Bauhaus-Universität Weimar (BUW) has executed the research project FE 02.202/2000/MRB (LONDONG, J., Meyer, D. & Hartmann, M. (2010): Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen, Bericht zum Forschungsprojekt FE 02.202/2000/MRB: Einsatz von Pflanzenkläranlagen an unbewirtschafteten Autobahnrastanlagen]. Wirtschafts-verlag NWBremerhaven. 9783869180144). The main objective was to update out-dated planning and decision-making aids for the disposal of PWC plants. The key findings with regard to decentralized wastewater treatment were:

1. An important reason for the fact that the effluents of PWC plants cannot be treated decentrally in conventional simple treatment processes is the high urine content in the wastewater.
2. In connection with water-saving sanitary technology, the wastewater therefore has high concentrations, especially for nitrogen.
3. Due to the nitrification, hydrogen ions (H<sup>+</sup>) are released during the biological treatment of the wastewater, depending on the buffer capacity of the flush water used, thus buffering capacity is consumed. However, for the recovery of buffer capacity by denitrification, readily degradable C compounds are missing.
4. A high proportion of toilet paper and other coarse particles characterizes the effluents of PWC plants.

5. The entry of solids from improperly dimensioned, constructively designed and operated primary clarifiers causes colmation in planted soil filters.

Overall, it could be shown that the typical waste water characteristics of PWC systems are a major cause of the inadequacies in the practiced wastewater disposal, especially in decentralized treatment.

On the basis of the present findings and recommendations, the design and construction of the wastewater system for a PWC plant was scientifically supported with the project FE 02.0325 / 2011 / HRB and the operation was evaluated.

On the one hand, attention was focused on the effective retention of solids in a primary sedimentation, which is particularly important for the operational safety of soil filters. On the other hand, the separation of male urine from wastewater was investigated as a possible option for stabilizing the treatment process.

The PWC plant Jalmer Moor, which is located at the A7 motorway in the direction of Hamburg between the exits Tarp (4) and Schleswig (5) at kilometer 22.5, served as a pilot plant and thus an investigation site.

#### 2 Integration of the experimental facilities into the wastewater technology concept of the PWC system Jalmer Moor

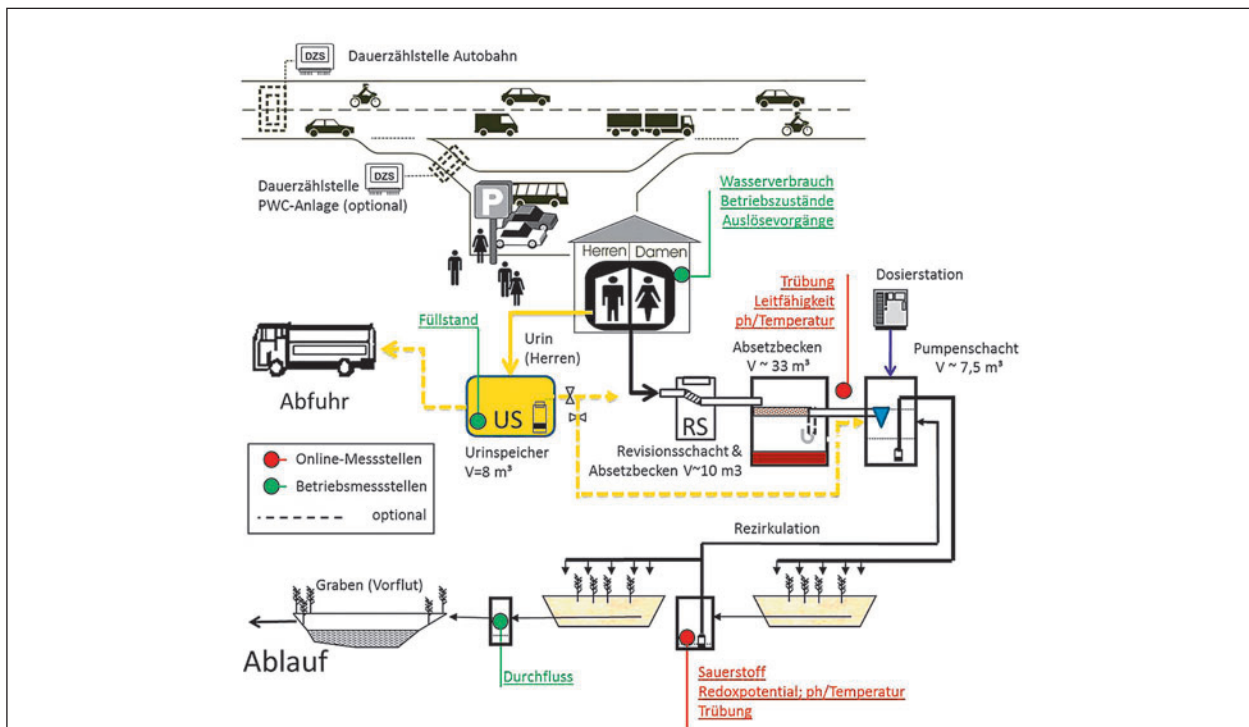
##### 2.1 Pilot plant

The concept for the pilot plant (Figure 1) provides the separate detection of male urine. The removal as well as the partial co-treatment of the collected urine are available as disposal possibilities.

The remaining wastewater is fed into the primary sedimentation.

For the biological treatment stage (BS), a two-stage expansion with alternatively sequential or parallel operation of the two stages was recommended. The second stage should only serve as a protection against exceeding the limit values in the test mode and for the subsequent control operation as an extension option.

Figure 2 shows a simplified version of the system with its most important components, as implemented



**Fig. 1:** Operating and measuring concept for the evaluation of urine separation and optimization of the pre-treatment of the PWC plant Jalmer Moor

on the PWC Jalmer Moor. In addition to the buildings (urine storage and small sedimentation basin) specially designed for the trial operation, the wastewater system is characterized by the following features:

- The settling basins and the pumping station (or the combination building) are constructed in an open construction and the inlet and outlet pipes of the sedimentation basins (small and large sedimentation tank) are at the same level,
- the wastewater is lifted from the pumping station to the level of the soil filters and flows through the plant from here in a free slope,
- the recirculation is not hydraulically decoupled from the effluent and is therefore difficult to control,
- a sequential operation of the soil filters is not possible,
- most of the system components are located in the range of fluctuating ground or mud water levels.

Despite these disadvantageous conditions, the results compiled in chapter 3 were obtained and recommendations from the pilot and regular operation of the pilot plant were derived.

### 3 Summary and Conclusions

The high proportion of toilet paper and other solids in wastewater from PWC plants cause increased demands on their mechanical pre-treatment. The hydraulic residence time increases the microbiological degradation of the retained solids since the particulate organic compounds are converted into methane and carbon dioxide under anaerobic conditions. The gases mainly produced in soil sludge can adhere to solid particles with good surface wettability and carry them to the water surface (flotation). As a result, a floating sludge blanket can develop which reaches a very high thickness ( $> 10$  cm) and concentration (solids contents  $> 12\%$ , partly stiffest consistency), especially in settling tanks of PWC plants.

As a result of the investigations on the layer structure and the floating sludge blanket in the small settling tank, the following design recommendations for the settling tanks of PWC systems can be given:

- A minimum clearance of at least 50 cm should be ensured between the water level and the bottom of the inlet pipe in order to prevent clogging in the inlet by floating sludge. Accordingly, the inflow and outflow of the primary sedimentation must be offset by at least 50 cm in height.

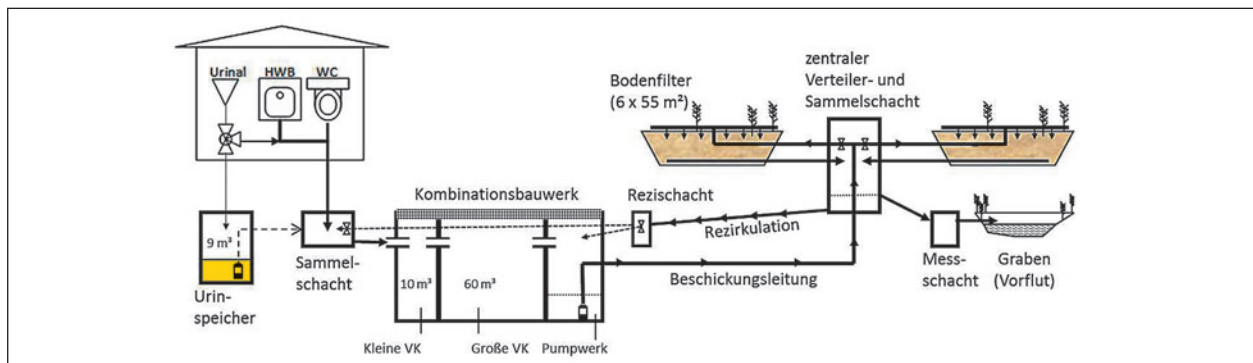


Fig. 2: Schematic of the wastewater treatment plant at PWC Jalmer Moor

- The complete accretion of the tank surface with floating sludge must be prevented by means of suitable fixtures (for example, immersion tubes) in suitable places or places in order to avoid difficulties in the removal of sludge.
- The outlet of the primary sedimentation tank should be at a depth of between 0.5 and 1.0 m below the water level because the lowest concentrations of solids are to be expected here. In addition, the discharge of ascending solids must be prevented constructively (e.g., trapped plates at the foot of vertical dip tubes).

The investigations on the suitability test of a curved screen showed, on the one hand, the great performance potential of the curved screen compared to conventional settling tanks. Both are considered to be equivalent in respect of the retention of particulate matter, but the essential advantage of the curved screen is the separation of fresh wastewater. As a result the organic load of the wastewater, which is to be treated biologically, are substantially reduced. On the other hand, it became clear that the high proportion of toilet paper in the wastewater could lead to clogging of the screen plates and thus to serious operating disturbances. In fact, the tested version of a curved screen is not a suitable alternative to a conventional primary settling tank. Further studies with a design that is specially adapted to the requirements of PWC systems (smaller width, longer screen, possibly maceration of the feed) are still considered useful.

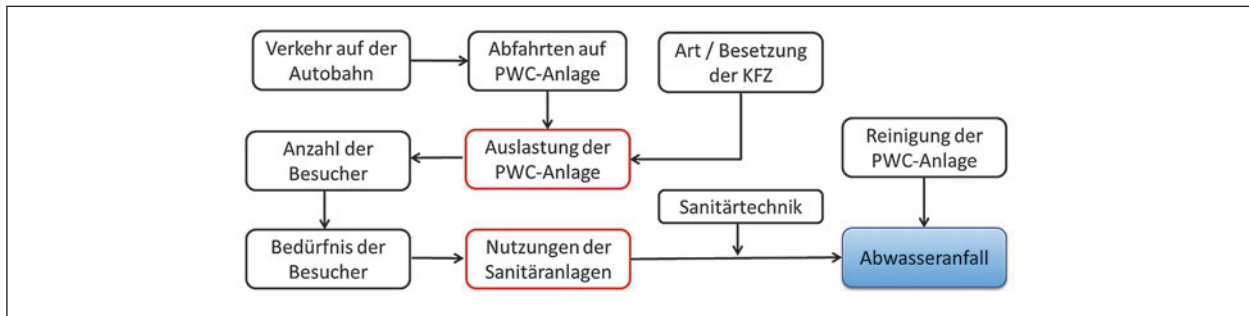
Due to the short stay of the visitors and the restricted service (only toilets), the wastewater from the PWC plant is characterized by a high proportion of urine. As a result, the separate collection of male urine, which is comparatively easy to achieve with waterless urinals, can reduce the nutrient load in the wastewater, in particular with respect to nitrogen

load. These are problematic in biological wastewater treatment with conventional processes, since the nitrification which inevitably occurs in the aerobic environment can lead to acidification and thus affect all other degradation processes. Conversely, the urine separation can contribute to the stabilization of the treatment process.

As a result of the studies on urine separation, it can be stated that separation can make a significant contribution to the safeguarding of limit values and, in particular, to the stabilization of nitrification in the soil filter. However, consideration must be given to the interactions with the upstream process of the mechanical pre-treatment of the wastewater, e.g. higher effluent concentration with respect to phosphorus. Ultimately, however, the urine separation represents a comparatively inexpensive solution for the compensation of stress peaks in the inlet of the sewage treatment plant and is therefore generally recommended for PWC plants with decentralized sewage treatment. The waterless urinals have proven to be unproblematic in operation.

The documentation and continuous remote monitoring of the plant operation, however, make it clear that the separation of urine alone can not guarantee the compliance with legal limits. Eminently important is the proper operation of the entire facility, which requires a solid specialist and should therefore be contracted to a suitable institution / company. This can not be dispensed with day-to-day inspections, which would in principle be carried out by trained or educated personnel of the highway maintenance agency. The time required for this can only be limited by a suitable design of the plant. In the design of future plants, therefore, the interests of the subsequent operator - and thus the experience of the motorway maintenance agency - have to be considered. The main requirement is that even supposedly simple sewage





**Fig. 3:** Relationship of wastewater generation at a PWC and traffic on the motorway

treatment plants on motorways are planned, built and operated according to the state of the art. The design work carried out at the Jalmer Moor PWC plant is unfortunately a good example of the fact that investment in modern architecture and technology does not necessarily lead to lower operating costs for the PWC plant and can significantly increase the costs for maintenance.

For the continuation or repetition of the investigations carried out elsewhere, it should be pointed out that the continuous remote monitoring of the plant operation as well as the simultaneous traffic counting on the motorway and the PWC system are suitable methods to produce practically relevant results. The application of continuous  $\text{NH}_4\text{-N}$  measuring is recommended for remote monitoring of effluent. It is absolutely necessary to know the flow data for inflow and recirculation (because the balance is otherwise incomplete). In addition, the recirculation should at least be adjustable within certain limits. It is also important to note that the measurement technology requires regular monitoring. Irrespective of the technical requirements it is eminently important that changes in the operating settings are precisely documented and promptly communicated in order to avoid misinterpretations of measuring results.

Information on how to determine the load and utilization of a PWC system could be derived from the evaluation of the water consumption data and the traffic census.

The water consumption and the wastewater from PWC depend to a large extent on the number of users: the more road users use the toilet facilities, the more water is consumed and the more wastewater is generated. The number of users is dependent on the number and type or occupation of the vehicles traveling onto the PWC parking area and is ultimately directly linked to the traffic of the motorway. Figure 3 shows the relationship of

wastewater generation at a PWC plant and traffic on the motorway, taking into account the different needs of the users as well as the different sanitary equipment of the PWC as additional criteria.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Ablauf des Vorhabens</b> .....	11	3.1.6	Überwachung der Ablaufqualität .....	30
1.1	Stand des Wissens & Projektziele.....	11	3.2	Schwimmschlammdeckenbildung .....	31
1.2	Projektphasen und Projektlaufzeit.....	12	3.3	Untersuchungen an einem Bogensieb als Ersatz für ein Vorklärbecken .....	32
1.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	13	3.3.1	Hintergrund und Ziele des Eignungstests .....	32
<b>2</b>	<b>Einbindung der versuchstechnischen Einrichtungen in die abwassertechnische Konzeption der PWC-Anlage Jalmer Moor (Ergebnisse der Planungs- und Bauphase)</b> .....	14	3.3.2	Einbau und Betrieb von Bogensieb und Probenahmesystem .....	33
2.1	Ausgangssituation und geplantes Vorgeben .....	14	3.3.3	Leistungsvergleich von Bogensieb und konventioneller Vorklärung .....	36
2.2	Baulich-betriebliche Konzeption der Pilotanlage.....	14	3.3.4	Notwendige Modifikationen des Bogensiebes im Versuchsbetrieb .....	38
2.3	Implementierung der Pilotversuche in den Planungsprozess.....	16	3.4	Auswirkungen der Urinseparation auf die Abwasserbehandlung .....	39
2.4	Bauliche Umsetzung der Pilotanlage und Konsequenzen für das Untersuchungsprogramm des Forschungsvorhabens.....	17	3.4.1	Hintergrund und Ziele der Urinseparation.....	39
2.4.1	Installationen im WC-Häuschen .....	18	3.4.2	Durchführung der Messkampagnen .....	41
2.4.2	Abwassertechnische Anlagen .....	20	3.4.3	Auswirkungen auf den anaeroben Abbau von Feststoffen im Vorklärbecken .....	42
2.4.3	Online-Messtechnik und Feldlabor.....	21	3.4.4	Auswirkungen auf die biologische Abwasserbehandlung.....	43
2.4.4	Dauerzählstellen.....	24	3.5	Fernüberwachung und Dokumentation des Anlagenbetriebs .....	44
<b>3</b>	<b>Untersuchungen an der Pilotanlage Jalmer Moor</b> .....	25	3.5.1	Überwachung der Ablaufqualität des Bodenfilters .....	44
3.1	Schichtenaufbau und Schwimmschlammdecke im kleinen Absetzbecken.....	25	3.5.2	Wasserverbrauch –und Abwasseranfall ....	45
3.1.1	Hintergrund und Ziele der Messkampagne .....	25	<b>4</b>	<b>Auslastung der PWC- Anlage</b> .....	48
3.1.2	Vorbereitung und Durchführung der Messkampagne .....	26	4.1	Ziele und Methoden der Verkehrszählung .....	48
3.1.3	Entwicklung von Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert.....	27	4.2	Auslastung der PWC-Anlage im Zeitraum Dezember 2015 bis Juni 2016.....	50
3.1.4	Schichtenprofile für Trübung bzw. Feststoffgehalte.....	28	<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b> .....	52
3.1.5	Schlammspiegelhöhen und pH-Werte im Ablaufbereich .....	30	<b>Literatur</b> .....		54
			<b>Bilder</b> .....		54
			<b>Tabellen</b> .....		56



# 1 Veranlassung und Ablauf des Vorhabens

## 1.1 Stand des Wissens & Projektziele

Die spezifische Charakteristik der an PWC-Anlagen anfallenden Abwässer (viel Urin und hoher Anteil von Toilettenpapier und Grobstoffen im Abwassergemisch), deren Ursache (Nutzerverhalten, sparsame Sanitärtechnik) und schließlich die Konsequenzen (Betriebsstörungen durch Verstopfungen und Ablagerungen, Schwierigkeiten bei der biologischen Behandlung und Schlammabfuhr) erfordern angepasste Konzepte und Technologien für einen wirtschaftlichen und sicheren Betrieb der Abwasserentsorgung.

Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) hatte die Bauhaus-Universität Weimar (BUW) das Forschungsvorhaben FE 02.202/2000/MRB [LONDONG et al. 2010] mit dem Ziel bearbeitet, veraltete Planungs- und Entscheidungshilfen bezüglich der Abwasserentsorgung von PWC-Anlagen zu aktualisieren. Der Schwerpunkt des Projektes lag in der Entwicklung, Durchführung und Auswertung von Messkampagnen zur Ermittlung der an PWC-Anlagen anfallenden Abwassermengen und deren Beschaffenheit. Die wesentlichen Erkenntnisse in Hinblick einer dezentralen Abwasserbehandlung waren [LONDONG et al., 2010]:

1. Ein wichtiger Grund dafür, dass die Abwässer von PWC-Anlagen nicht in konventionellen einfachen Behandlungsverfahren dezentral behandelt werden können, ist der hohe Urinanteil im Abwassergemisch.
2. In Verbindung mit wassersparender Sanitärtechnik weist das Abwasser deshalb hohe Konzentrationen, insbesondere für Stickstoff auf.
3. Bei der biologischen Behandlung des Abwassers kann es deshalb in Abhängigkeit der Pufferkapazität des verwendeten Spül- bzw. Waschwassers zu einer Absenkung des pH-Wertes kommen, da durch die Nitrifikation Wasserstoff Ionen ( $H^+$ ) freigesetzt werden und somit Pufferkapazität verbraucht wird. Für eine Rückgewinnung von Pufferkapazität durch Denitrifikation fehlen aber leicht abbaubare C-Verbindungen.
4. Die Abwässer von PWC-Anlagen sind ferner durch einen hohen Anteil an Toilettenpapier und anderen Grobstoffen charakterisiert.

5. Der Eintrag von Feststoffen aus nicht richtig dimensionierten, konstruktiv gestalteten und betriebenen Vorklärungen führt bei bepflanzten Bodenfiltern (Pflanzenkläranlagen) zu Kolmation.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die typische Abwassercharakteristik von PWC-Anlagen eine wesentliche Ursache für die Unzulänglichkeiten bei der praktizierten Abwasserentsorgung ist, insbesondere bei der dezentralen Behandlung. Das Forschungsvorhaben FE 02.202/2000/MRB wurde 2009 erfolgreich abgeschlossen und der Abschlussbericht erschien in der Schriftenreihe Verkehrstechnik der Bast (Band V 195). Die Bemessungsgrundlagen in Form von nutzerspezifischen Abwasserfachten sowie Lösungsvorschläge für die Abwasserentsorgung wurden im DWA Merkblatt 279 „Schmutzwasser von unbewirtschafteten Rastanlagen“ veröffentlicht [ATV-DVWK-M 279, 2005]. Sowohl dem Abschlussbericht als auch dem DWA M279 sind außerdem Vorschläge für theoretisch sinnvolle Modifikationen bei Planung, Bau und Betrieb von Abwasserentsorgungssystemen auf PWC-Anlagen zu entnehmen, die jedoch einer Verifikation im Praxistest bedürfen. An dieser Stelle setzte das hier vorgestellte Anschlussvorhaben FE 02.0325/2011/HRB „Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen“ nahtlos an.

Aufbauend auf den vorliegenden Erkenntnissen und Empfehlungen sollte mit dem Vorhaben FE 02.0325/2011/HRB die Planung und Umsetzung der abwassertechnischen Sanierung einer PWC Anlage begleitet sowie der Betrieb der Anlage bzw. einzelner Einheiten evaluiert und optimiert werden. Im Ergebnis sollte gezeigt werden, ob die Abwässer von PWC-Anlagen zuverlässig und effizient mit etablierten biologischen Klärverfahren vor Ort gereinigt werden können. Die Untersuchungsschwerpunkte waren hierbei:

- der Praktikabilitätsnachweis einer separaten Erfassung und Entsorgung von Urin
- sowie
- die Optimierung der Vorklärung der Schmutzwässer.

Die Abtrennung von männlichem Urin aus dem Abwassergemisch wurde als mögliche Option zur Stabilisierung des Reinigungsprozesses angesehen - insbesondere dann, wenn naturnahe Verfahren zum Einsatz kommen. Ziel der Optimierung in Bezug auf die Vorklärung der Schmutzwässer war der

wirksame Rückhalt von Feststoffen, wie er speziell für die Betriebssicherheit von Bodenfiltern entscheidend ist. Neben der Erarbeitung von Hinweisen zur Dimensionierung, konstruktiven Ausgestaltung und Betriebsweise (Schlammentnahme) von konventionellen Absetzanlagen sollten auch die Potentiale eines Bogensiebes als verfahrenstechnische Alternative untersucht werden.

Insgesamt sollten die Optimierungsmaßnahmen auf eine verbesserte Prozessstabilität, die Reduzierung des Betriebsaufwandes und die Reduzierung von Behandlungs- und Entsorgungskosten abzielen. Neben verfahrenstechnischer Optimierungen galt das Interesse einem möglichst robusten Betriebsschema, welches die einfache Steuerung und pragmatische Bedienung erlaubt. Für den Fall, dass sich die theoretisch entwickelten Optimierungsansätze an einer Pilotanlage unter Praxisbedingungen bewähren, sollten sie auch auf andere PWC-Anlagen übertragen und dort ggf. weiterentwickelt werden.

Als Pilotanlage und somit Untersuchungsstandort diente die PWC Anlage Jalmer Moor, die sich an der BAB A7 in Fahrtrichtung Hamburg zwischen den Abfahrten Tarp (4) und Schleswig (5) bei Betriebskilometer 22,5 befindet. Aus Richtung Dänemark kommend ist es die zweite PWC-Anlage und dritte Rastmöglichkeit auf bundesdeutschem Gebiet. Die Anlage wurde im Ergebnis einer bundesweit von der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) an die Landbetriebe gestellten Anfrage zur Mitwirkung am Forschungsprojekt ausgewählt. Ausschlaggebend für die Wahl als Untersuchungsstandort war, dass die PWC-Anlage ohnehin verkehrs- sowie abwassertechnisch saniert werden sollte und ausreichend Platz für evtl. zusätzliche Versuchseinrichtungen zur Verfügung stand.

## 1.2 Projektphasen und Projektlaufzeit

Die umfassende verkehrs- und abwassertechnische Sanierung einer PWC-Anlage stellt für sich genommen schon ein komplexes (Bau-)vorhaben dar, bei dem die unterschiedlichen Interessen der an Planung, Bau und Betrieb beteiligten Akteure eine wichtige Rolle spielen. Im speziellen Fall der Sanierung der PWC-Anlage Jalmer Moor galt es darüber hinaus, die Durchführung von Pilotversuchen und Messkampagnen sicherzustellen, d. h. auch die zusätzlich seitens des Forschungsprojektes an die bauliche und betriebliche Konzeption der PWC-Anlage gestellten Anforderungen mussten Berücksichtigung finden. In der Konsequenz waren

die Mitwirkung bei der Entwurfs- und Ausführungsplanung sowie die Kontrolle der Ausführung wichtige Bestandteile des Forschungsvorhabens, wenngleich es sich hierbei vorrangig um Ingenieurleistungen und nur zu einem geringen Teil um wissenschaftliche um Arbeiten handelte. Das Vorhaben war letztlich in vier Phasen gliederte:

- Einbringen in die Planung (Planungsphase),
- Kontrolle der Ausführung (Bauphase),
- Evaluation und Optimierung des Anlagenbetriebs (Untersuchungsphase),
- Ergebnisauswertung und Abschlussbericht (Abschlussphase).

In der Planungsphase sollten die Belange des Forschungsprojektes bei der Sanierungsplanung der PWC-Anlage integriert werden, wobei der Schwerpunkt auf Dimensionierung und Konstruktion der Urinseparation und modifizierten Vorklärung sowie diverser Messstellen lag. In der Bauphase sollte die ordnungsgemäße und richtige Umsetzung der eingeplanten Maßnahmen kontrolliert werden. Für beiden Phasen wurde ein Zeitfenster von etwa 55% der gesamten Projektlaufzeit angesetzt, d. h. der Koordination von Bau- und Forschungsprojekt wurde von Anfang an große Bedeutung beigemessen. In der Untersuchungsphase, die antragsgemäß zwei Hauptreiszeiten (Sommerferien) und somit 12 Monate umfasst hätte, sollten die eigentlichen Messungen zur Evaluation und Optimierung der Anlagen durchgeführt werden. Die Abschlussphase war für die Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse vorgesehen.

Aus Tabelle 1-1 geht der Abgleich von ursprünglich geplantem (hellgraue Balken) und tatsächlich verwirklichtem Ablauf (dunkelgraue Balken) des Vorhabens hervor, wobei zwischen Bau- und Forschungsprojekt differenziert. Die Angaben zum geplanten Ablauf des Forschungsprojektes beziehen sich hierbei auf den Zeitpunkt der Antragstellung.

Als Laufzeit für das Forschungsprojekt waren ursprünglich 40 Monate im Zeitraum 01. September 2012 bis 31. Dezember 2015 angesetzt, wobei angenommen wurde, dass der Umbau der PWC-Anlage Jalmer Moor bereits Anfang 2014 abgeschlossen ist und die Untersuchungsphase spätestens im April/Mai 2014 beginnen kann. Tatsächlich sah der zur Auftaktveranstaltung am 30.10.2012 in Schleswig präsentierte Bauzeitenplan die Inbetriebnahme der PWC-Anlage frühestens im Oktober 2014 vor,

Projektlaufzeit (Jahr und Quartal) →	2013				2014				2015				2016			
Projektphasen und Bearbeitungsschritte ↓	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
<b>Bauprojekt</b>																
Planungsleistungen (Vor-, Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanung)	■	■	■	■	■	■	■	■								
Ausschreibung und Vergabe der Bauleistung			■	■	■	■	■	■								
Ausführung (Parkplatz, Hochbau & Kläranlage)						■	■	■	■	■						
Anlagenbetrieb									■	■	■	■	■	■	■	■
<b>Forschungsprojekt</b>																
Einbringen in die Planung (Planungsphase)	■	■			■	■	■	■	■							
Kontrolle der Ausführung (Bauphase)			■	■	■	■	■	■		■						
Evaluation und Optimierung des Anlagenbetriebs (Untersuchungsphase)							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ergebnisauswertung und Abschlussbericht (Abschlussphase)															■	■
<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></span> Planung <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #333333; border: 1px solid black; margin-left: 10px;"></span> Durchführung <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, #cccccc 2px, #cccccc 4px); border: 1px solid black; margin-left: 10px;"></span> Puffer																

Tab. 1-1: Ursprünglich geplanter und tatsächlich verwirklichter Ablauf des Vorhabens

wobei auch eine Verzögerung bis Frühjahr 2015 nicht auszuschließen war. Dementsprechend konnte auch die Untersuchungsphase erst später beginnen, weshalb eine kostenneutrale Verlängerung des Forschungsprojektes bis Ende Juli 2016 vereinbart wurde.

Infolge von Verzögerungen im Bauablauf, die u. a. bei der Asphaltierung des Parkplatzes entstanden, verschob sich die Wiedereröffnung der PWC-Anlage schließlich auf den 15.07.2015. In der Konsequenz wurde zunächst die zeitliche Abfolge des Untersuchungsprogramms geändert; später wurden aufgrund von Änderungen in der Ausführung der Anlage inhaltliche Anpassungen notwendig. Schließlich wurde die Projektlaufzeit im Juni 2016 um weitere drei Monate verlängert, um zufriedenstellende Ergebnisse erzielen zu können. Die Projektlaufzeit betrug somit vier Jahre im Ganzen.

### 1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Unterauftrag der BUW wirkten die INAWA GbR(99423 Weimar) sowie die Firma Rotox Klärtechnik(25712 Burg/Ditmarschen) im Forschungsvorhaben mit.

Die INAWA GbR unterstützte in der Planungs- und Bauphase den Abstimmungsprozess mit dem planenden Ingenieurbüro sowie dem zuständigen Landesbetrieb. Die abwassertechnischen Planungen wurden im Hinblick der Erfüllung der vom Forschungsvorhaben gestellten Anforderungen überprüft, die ordnungsgemäße und richtige Umsetzung der eingeplanten Maßnahmen kontrolliert.

Rotox Klärtechnik übernahm in der Untersuchungsphase die Betreuung der versuchstechnischen Einrichtung auf der PWC Jalmer Moor, wenn keine Mitarbeiter der BUW anwesend waren. Zu den Aufgaben gehörten Funktionskontrollen und Wartungsarbeiten aber auch das Durchführen und Dokumentieren von Untersuchungen mit einem Handmessgerät.

Während der Untersuchungsphase leisteten außerdem die Mitarbeiter der Autobahnmeisterei Schleswig wertvolle Unterstützung.

## 2 Einbindung der versuchs-technischen Einrichtungen in die abwassertechnische Konzeption der PWC-Anlage Jalmer Moor (Ergebnisse der Planungs- und Bauphase)

### 2.1 Ausgangssituation und geplantes Vorgehen

Generell stellt die Kombination aus Forschungs- und Bauprojekt für alle an Planung, Bau und Betrieb beteiligten Akteure eine große Herausforderung dar, weil hierbei auch Themen außerhalb der typischen Aufgabenbereiche verstanden und bearbeitet werden müssen. Dementsprechend wichtig ist ein koordinierter Abstimmungsprozess, der einen frühzeitigen und standhaften Konsens bezüglich gemeinsamer Ziele und Arbeiten herstellt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen“ bestand die wesentliche Herausforderung darin, dass einerseits der ordnungsgemäße Betrieb der Abwasseranlagen zu jeder Zeit gewährleistet sein musste (Einhalten von Grenzwerten im Ablauf). Andererseits sollten Leistungspotentiale neuer Verfahren bzw. Verfahrenskonzepte evaluiert und optimiert werden können, was jedoch im Fall des Erreichens ihrer Leistungsgrenze die Betriebssicherheit der Anlage gefährden konnte (Risiko von Grenzwertüberschreitung im Ablauf). Demnach musste ein baulich-betriebliches Konzept für die Abwasserbehandlung auf der PWC Jalmer Moor gefunden werden, welches sowohl für den dauerhaften Regelbetrieb als auch den temporären Forschungsbetrieb geeignet war.

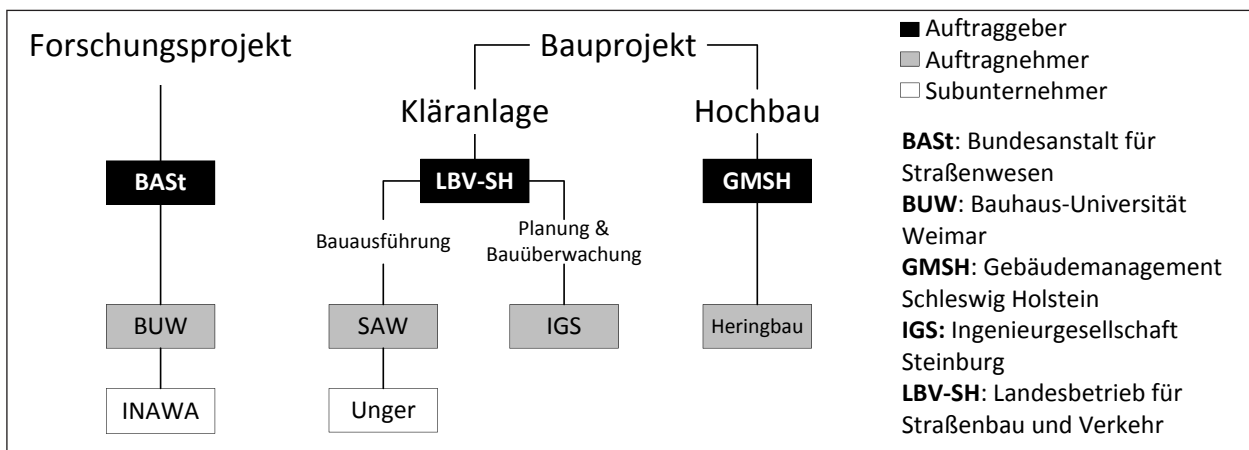
Ausgangspunkte für die Entwicklung und Umsetzung einer den Anforderungen sowohl von Regels als auch Forschungsbetrieb gerecht werdenden Pilotanlage waren zum einen das baulich-betriebliche Untersuchungskonzept, wie es von der BUW in der Ausschreibung zum Forschungsvorhaben unabhängig von der konkreten Situation auf der PWC-Anlage Jalmer Moor vorgeschlagen wurde. Zum anderen lag eine Entwurfsplanung zur Sanierung der PWC-Jalmer Moor, welches die Ingenieurgesellschaft Steinburg (IGS) im Auftrag des Landesbetriebes für Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein (LBV-SH) erstellt hatte.

Vorgesehen war, die vorliegende Entwurfsplanung unter Berücksichtigung der seitens des Forschungsvorhabens zusätzlich gestellten Anforderungen zu überarbeiten und letztlich eine mit allen beteiligten Akteuren (vgl. Bild 2-1) abgestimmte Ausführungsplanung zu erstellen.

Wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen, fanden jedoch nicht alle Anforderungen des Forschungsvorhabens beim Bau der Pilotanlage Berücksichtigung.

### 2.2 Baulich-betriebliche Konzeption der Pilotanlage

Zur Sicherstellung eines ordnungsgemäßen Regelbetriebs und zugleich flexiblen Versuchsbetriebs hatte die BUW in der Ausschreibung zum Forschungsvorhaben ein baulich-betriebliches Konzept für eine Pilotanlage vorgeschlagen (Bild 2-2). Es sah die separate Erfassung von männlichem Urin vor, wobei die einfache Installation von wasserlosen Urinalen hierfür den Ausschlag gab. Als Ent-



**Bild 2-1:** Überblick zu denen bei Planung und Bau der abwassertechnischen Anlage mitwirkenden Akteure im Forschungs- und Bauprojekt

sorgungsmöglichkeiten standen die Abfuhr sowie die partielle Mitbehandlung des gesammelten Urins zur Auswahl.

Die restlichen Abwässer sollten über einen Revisionsschacht (RS) zur Vorklärung geführt werden, der sowohl die Zulaufbeprobung als auch die Dokumentation und Beseitigung der in den Rohrleitungen auftretenden Inkrustationen erlaubt (Kamerabefahrungen, Spülungen). Der Revisionsschacht sollte zudem temporär als kleines Absetzbecken ( $V = 10 \text{ m}^3$ ) dienen und den Einbau eines Bogensieb gestatten. Gemeinsam mit dem obligatorischen großen Absetzbecken ( $V = 33 \text{ m}^3$ ) hätten dann drei verschiedene Verfahren zur mechanischen Vorklärung der Abwässer untersucht werden können.

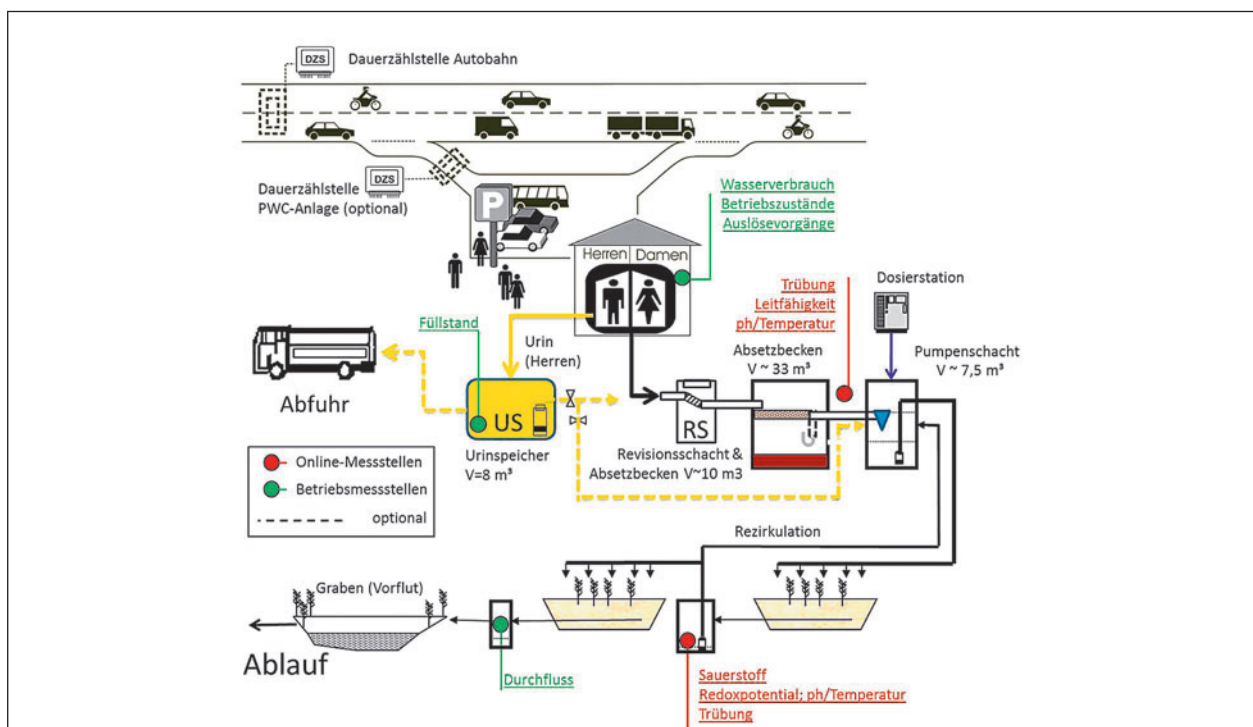
Für die biologische Behandlungsstufe (BS) wurde unabhängig vom Verfahren ein zweistufiger Ausbau (inkl. erforderlicher Nachklärung) mit wahlweise sequenzieller oder paralleler Betriebsweise der beiden Stufen empfohlen. Die zweite Stufe sollte hierbei lediglich als Sicherheit gegen Grenzwertüberschreitungen im Versuchsbetrieb und für den späteren Regelbetrieb als Erweiterungsmöglichkeit dienen.

Das Untersuchungskonzept zur Evaluation und Optimierung des Anlagenbetriebs sah grundsätzlich eine Kombination aus Fernüberwachung und Messkampagnen vor, wobei drei verschiedene Betriebsregime

der Pilotanlage vorgesehen waren (Tabelle 2-1). Prioritäre Ziele des Untersuchungsprogramms waren:

- Nachweis kritischer Nährstoffverhältnisse im Zulauf zur biologischen Stufe (nach mechanischer Vorklärung), respektive die Wirksamkeit der Urinseparation als vorgeschlagene Gegenmaßnahme,
- Evaluation und Optimierung der Phasenseparation im Hinblick des sicheren Rückhalts von Feststoffen (Schutz vor Kolmation) sowie deren gezielten Hydrolyse (interne C-Quelle für die Denitrifikation der Abwässer),
- Verifizierung von Bemessungsparametern, d. h. Belastungssituation.

Im Rahmen der Fernüberwachung sollten die Nutzungen der sanitären Anlagen, der Wasserverbrauch, der Füllstand im Urinspeicher und die Abwassermenge (Durchfluss im Ablauf) kontinuierlich aufgezeichnet und in einer zentralen Steuer- bzw. Bedieneinheit hinterlegt werden. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass diese Betriebsdaten ohnehin für den Regelbetrieb erforderlich sind und die erforderliche Mess-, Steuer- und Regeltechnik somit bauseits zur Verfügung steht (grün eingezeichnete Messstellen in Bild 2-2). Mit Hilfe von zusätzlicher Online-Messtechnik (rot eingezeichnet in Bild 2-2) sollte der Anlagenbetrieb permanent fernüber-



**Bild 2-2:** Lösungsansatz für ein Betriebs- und Messkonzept zur Evaluation der Urinseparation und Optimierung der Vorklärung auf der PWC-Anlage Jalmer Moor



wacht werden, um Auswirkungen der unterschiedlichen Betriebsregime langfristig dokumentieren und Funktionsstörungen rechtzeitig erkennen zu können. Dazu sollten Trübung, Leitfähigkeit, pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur, Sauerstoffgehalt und Durchfluss (Rezirkulation) aufgezeichnet und gemeinsam mit den elektronisch erfassten Betriebsdaten fernübertragen werden.

Ergänzend zu den abwassertechnischen Messstellen sollte in der Auf- oder Abfahrtsrampe zur bzw. von der PWC-Anlage eine automatische Verkehrszählstelle errichtet werden. In Verbindung mit einer in räumlicher Nähe zur PWC-Anlage befindlichen Dauerzählstelle auf der Autobahn sollte damit der Anteil des auf die PWC-Anlage auffahrenden Verkehrs  $q_{PWC}$  vom Gesamtverkehr auf der Autobahn  $q_{BAB}$  untersucht werden.

Im Rahmen von Messkampagnen während der Hauptreisezeiten sollten schließlich Detailuntersuchungen zur Feststellung der Leistungsfähigkeit und Optimierung einzelner Anlagenkomponenten sowie des Gesamtsystems erfolgen. In Ergänzung zu den online erfassten Messdaten sollten an relevanten Stellen (z. B. Zu- und Ablauf der Vorklärung, Ablauf bzw. der biologischen Stufe bzw. Rezirkulation) Abwasserproben entnommen und nasschemisch in einem mobilen Feldlabor analysiert werden.

### 2.3 Implementierung der Pilotversuche in den Planungsprozess

In der zu Projektbeginn vorliegenden Entwurfsplanung zur Sanierung der PWC-Anlage Jalmer Moor waren die zur Durchführung der Pilotversuche benötigten baulich-betrieblichen Komponenten noch nicht berücksichtigt. Entsprechende Vorgaben wurden deshalb seitens der BUW und über das von ihr beauftragte Ingenieurbüro INAWA GbR eingebracht. Im Wesentlichen waren folgende Ergänzungen/Änderungen notwendig:

- Dauerzählstelle in der Auffahrts- oder Abfahrtsrampe der PWC-Anlage,
- wasserlose Urinale im Herrenbereich,
- Kontaktwasserzähler im Betriebsraum zur Verbrauchsmengenerfassung,
- Urinspeicher mit Füllstandanzeige und Dosiereinheit (Pumpe + flexible Leitung),
- Dosiereinheit im Betriebsraum der PWC-Anlage und Leitungen zum Pumpenschacht für die Zugabe von Alkalien (zur Mitbehandlung von Urin),
- zweites (kleineres) Absetzbecken mit Möglichkeit zur Installation des Bogensiebes,
- zweistraßige Ausführung der biologische Behandlungsstufe mit der Möglichkeit zur sequenziellen und parallelen Betriebsweise),
- geeignete Probenahmestellen mit Höhenversatz (Zu- und Ablauf Vorklärung, Ablauf Bodenfilter und Zulauf Rezirkulation),
- Durchflussmessung im Ablauf der Bodenfilter bzw. im Zulauf der Schönungsteiche.

Bezüglich der Installation der Dauerzählstelle sowie der wasserlosen Urinale und der Kontaktwasserzähler (die drei erstgenannten Punkte) wurden entsprechende Vereinbarungen mit dem LBV-SH sowie der den Hochbau ausführenden Firma Hering getroffen. Alle anderen Anlagenteile waren Bestandteil der abwassertechnischen Planung und somit des Abstimmungsprozesses mit IGS (vgl. Bild 2-1). Aus Bild 2-3 geht die vorgesehene Implementierung der zusätzlichen Anlagenteile hervor.

Neben Vorschlägen zur Konstruktion und Betriebsweise der für das Forschungsvorhaben notwendigen Anlagen wurden von der BUW zahlreiche Hinweise bezüglich Bemessung und Gestaltung der abwassertechnischen Anlagen gegeben, die entsprechend protokolliert und kommuniziert wurden.

Untersuchungsschwerpunkt	1. Phase (1. – 4. Monat)	2. Phase (5. – 8. Monat)	3. Phase (8. – 12. Monat)
Urinseparation	Sammlung des Urins im Speicher und Abfuhr zu Kläranlage (keine Mitbehandlung)	Dosierung von Urin in Pumpenschacht / zum Rechengut (teilw. Mitbehandlung)	Dosierung von Urin und Lauge (NaOH <sub>2</sub> ) (Optimierung der Mitbehandlung)
Vorklärung	großes Absetzbecken	kleines Absetzbecken & Bogensieb	favorisiertes Verfahren bzw. Kombinationen

Tab. 2-1: Ursprünglich geplantes Betriebsregime der Pilotanlage

Eine Besonderheit stellte die Konstruktion und Betriebsweise der Bodenfilteranlage dar: Den späteren Anschluss der gegenüberliegenden PWC-Anlage Jalm berücksichtigend waren insgesamt sechs Filtersegmente vorgesehen, die aus einem zentralen Pumpenschacht separat beschickt werden können. Im Zeitraum der Forschungstätigkeit sollten drei Filter als erste Reinigungsstufe (Filter 1-3) und die anderen drei Filter als nachgeschaltete Nachbehandlungsstufe (Filter 4-6) betrieben werden (sequenzielle Betriebsweise). Im anschließenden Regelbetrieb sollten dann die Abwässer der PWC-Anlagen Jalm Moor und Jalm gemeinsam über dann 6 parallel betriebene Filter gereinigt werden. Für fünf der sechs Filtersegmente war eine sternförmige und somit praxiserprobte Abwasserverteilung geplant. Das sechste Filtersegment sollte indes nicht bepflanzt und nach dem Vorbild eines Tropfkörpers über einen Drehsprenger beschickt werden.

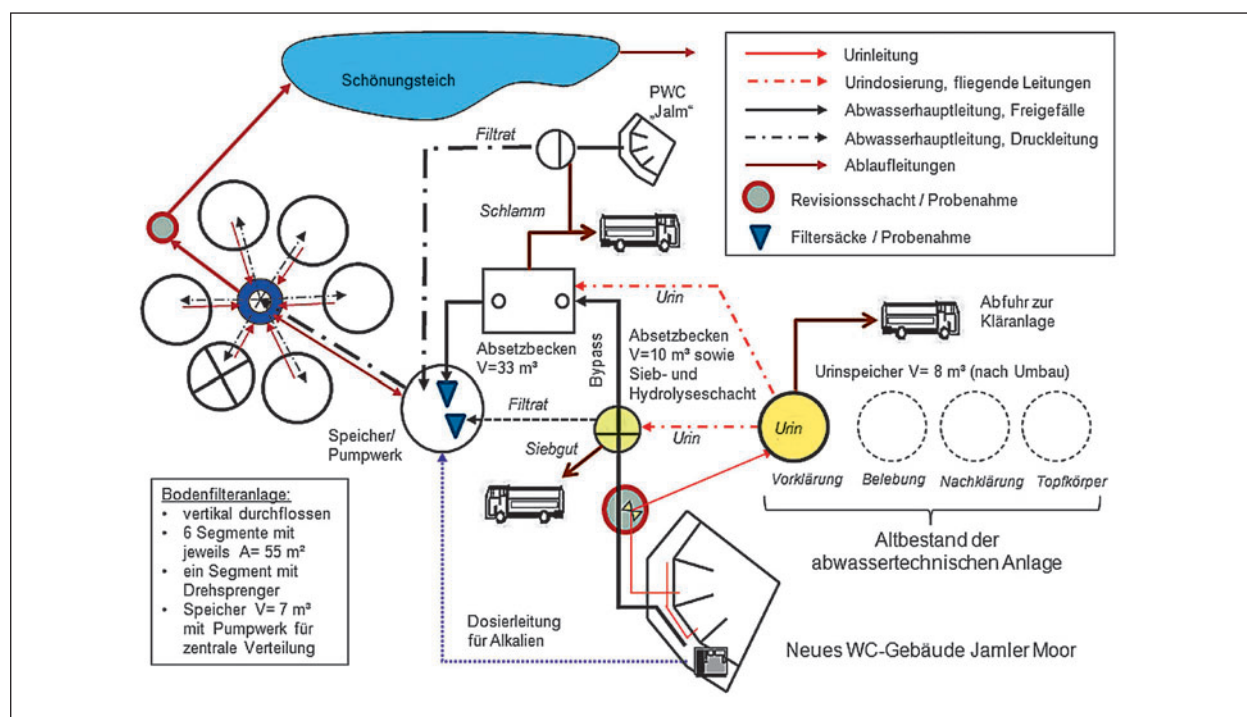
Die Ausschreibung zum Bau der abwassertechnischen Anlagen wurde Mitte November 2014 veröffentlicht, doch fehlten darin – mit Ausnahme des Urinspeichers und des kleinen Absetzbeckens – wesentliche Elemente der Pilotanlage. Der Zuschlag wurde im Januar 2015 erteilt und der Baubeginn war im Februar 2015. Der Abstimmungsprozess zur Implementierung der Forschungsanlagen musste deshalb parallel zum Bau der Kläranlage fortgesetzt werden, was einen erheblichen und außerplanmäßigen

Einsatz der BUW erforderte. Um zumindest die wichtigsten Forschungsfragen vom ursprünglichen Untersuchungsprogramm beantworten zu können wurden Umbauten am Vorklärbecken, am Urinspeicher, am Ablaufmessschacht und am Rezirkulationsschacht erforderlich. Undichtigkeiten an der Anlage, die erst nach Inbetriebnahme offensichtlich wurden und eindringendes Moorwasser zur Folge hatten, konnten bis zum Schluss der Untersuchungsphase nicht beseitigt werden.

Die unzureichende Berücksichtigung der für das Forschungsprojekt notwendigen baulich-technischen Voraussetzungen ist letztlich auf Schnittstellenprobleme in der Planungs- und Bauausführung zurückzuführen (vgl. Bild 2-1), die durch den externen Forschungsnehmer nicht kompensiert werden konnten. Gezwungenermaßen mussten deshalb die Ziele und Methoden der Untersuchungen den baulichen und betrieblichen Gegebenheiten der PWC Anlage Jalm Moor angepasst werden.

## 2.4 Bauliche Umsetzung der Pilotanlage und Konsequenzen für das Untersuchungsprogramm des Forschungsvorhabens

Mit Focus auf die abwassertechnischen Fragestellungen wird nachfolgend die Realisierung der Pilot-



**Bild 2-3:** Überarbeitete Entwurfsplanung der abwassertechnischen Anlagen auf der PWC-Anlage Jalm Moor für einen kombinierten Versuchs- und Regelbetrieb

anlage erläutert, wobei zwischen den Einbauten im WC-Gebäude (Hochbau), der abwassertechnische Anlage (Tiefbau) sowie der zusätzlich installierten Online-Messtechnik differenziert wird. Die technische Umsetzung der simultanen Verkehrszählung auf der Autobahn und Auffahrtsrampe zur PWC-Anlage wird am Ende des Abschnitts beschrieben.

#### 2.4.1 Installationen im WC-Häuschen

Der Bau des WC-Gebäudes wurde im Oktober 2014 durch die Firma Hering Bau GmbH & Co. KG begonnen und bis zum Jahresende planmäßig fertiggestellt (Bild 2-4). Die Architektur des Hochbaus ist durch einen radialen Grundriss geprägt, der die Sicherheit und Akzeptanz der Nutzer fördern soll (Bild 2-5). Alle Eingänge können eingesehen und einzeln verschlossen werden. Der großzügige Betriebsraum erleichtert den laufenden Betrieb der PWC-Anlage (Reinigung und Wartungsarbeiten).

Das WC-Häuschen verfügt über sieben separate Sanitärtrakte, wobei drei mit wasserlosen Urinalen und Handwaschbecken (Männer) und die anderen vier mit WC- und Handwaschbecken (Unisex) ausgestattet sind. Eines der Letztgenannten ist als Behinderten WC ausgeführt.

Die wasserlosen Urinale besitzen eine spezielle Gummimembran als Geruchsverschluss sowie einen Wasseranschluss für Zwangs- bzw. Sonderspülungen, die jedoch nicht vom Benutzer ausgelöst werden können. Die Kombination ermöglicht zum einen die Optimierung der Urinerfassung (Reinigung, Geruchsvermeidung). Zum anderen wird die Rückbauoption berücksichtigt, d. h. der nachträgliche Einbau wassergespülter Urinale. Die Abwässer der Urinale (sog. Gelbwässer) können wahlweise in einer

separaten Leitung zum Urinspeicher oder mit den restlichen Abwässern aus Handwaschbecken und WCs zur Vorklärung geführt werden. Im Betriebsraum ist rückseitig am Urinal ein 3-Wege Kugelhahn angebracht, der die Urinseparation oder das Zusammenführen aller Abwässer ermöglicht. (Bild 2-6).

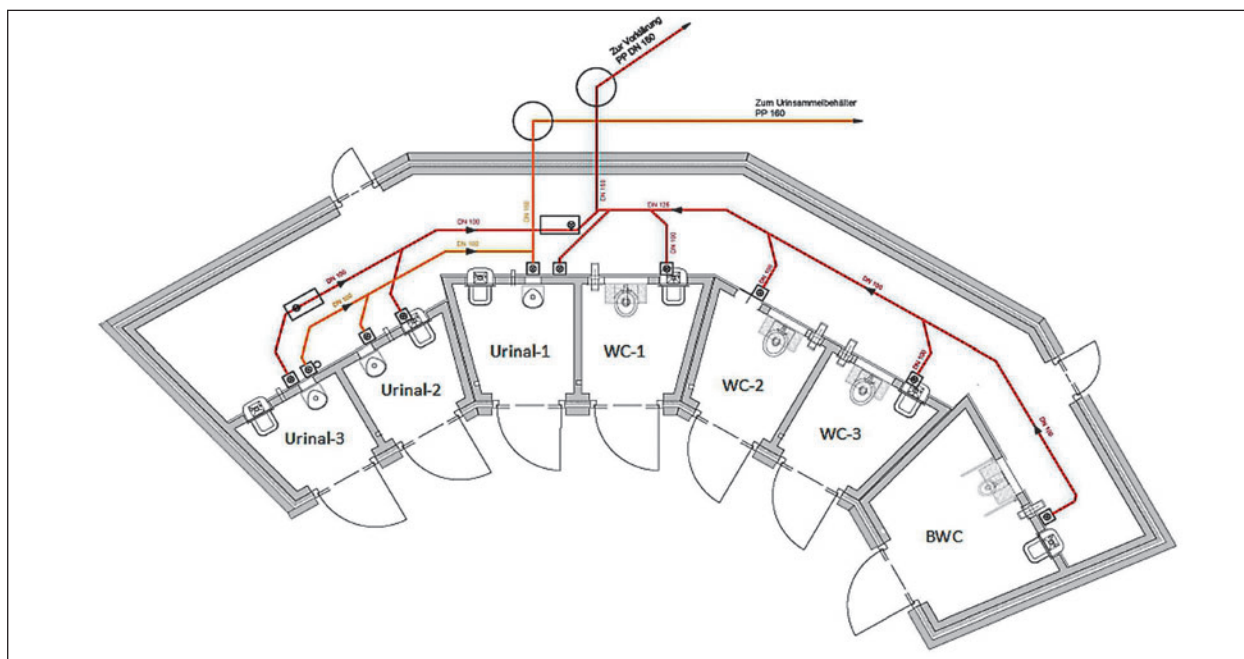
Die Benutzung der einzelnen Sanitärtrakte konnte über die Ver- und Entriegelung der Tür (Schließkontakte) registriert werden. Die Daten wurden auf einem Rechner im Betriebsraum der PWC Anlage hinterlegt und auf einen Server der Firma Hering-Bau GmbH übertragen. Die BUW hatte über das Internet Zugang zu diesem Server und konnte die Daten als CSV-Datei herunterladen. Obschon die technischen Voraussetzungen zur Dokumentation der Nutzungen gegeben waren, verhinderte ein Softwarefehler auf dem Rechner im Betriebsraum die sinnvolle Auswertung. Zum einen wurden nicht alle Sanitärtrakte angezeigt (Urinal-1 fehlt), zum anderen waren die vorliegenden Datensätze unvollständig und fehlerhaft (WC-1, Urinal-2 und Urinal-3). Trotz mehrfacher Anstrengungen seitens der Hering Bau GmbH & Co. KG konnte der Fehler bis zum Ende der Untersuchungen nicht behoben werden, so dass eine Auswertung im Hinblick des Nutzerverhaltens letztlich nicht möglich ist.

Auch bezüglich der messtechnischen Erfassung des Wasserverbrauchs müssen Abstriche bei der Auswertung hingenommen werden. Zwar wurden wie vereinbart drei Wasserzähler installiert, um den Wasserverbrauch einzelner Bereiche zu erfassen:

1. Hauptwasserzähler (Gesamtverbrauch),
2. Hochdruckspülgerät (Reinigung),
3. wasserlose Urinale(Zwangsspülung),



**Bild 2-4:** altes (links) und neues (rechts) WC-Häuschen der PWC-Anlage Jalmer Moor



**Bild 2-5:** Grundriss des WC-Häuschens mit separaten Urinleitungen



**Bild 2-6:** Urinalkabine (links) und rückseitiger Anschluss mit Option zur Urinseparation (rechts)

allerdings wurden keine Kontaktwasserzähler verwendet, wie sie für die automatische und kontinuierliche Wasserverbrauchsmessung erforderlich gewesen wären. Aussagen zum Wasserverbrauch

können somit nur auf Basis der täglich - im Zeitraum der Messkampagnen auch stündlich - abgelesenen Zählerstände getroffen werden.

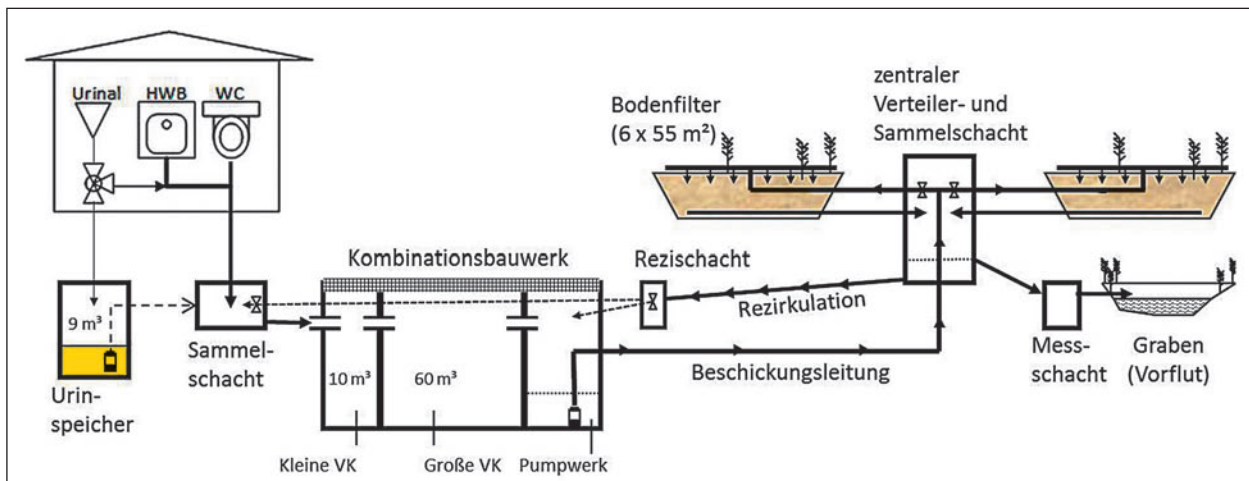


Bild 2-7: Verfahrensschema der abwassertechnischen Anlage auf der PWC Jalmer Moor

## 2.4.2 Abwassertechnische Anlagen

Bild 2-7 zeigt stark vereinfacht das abwassertechnische System mit seinen wichtigsten Komponenten, wie es auf der PWC Jalmer Moor umgesetzt wurde. Neben den speziell für den Versuchsbetrieb konzipierten Bauwerken (Urin-speicher und kleine Ab-setzbecken) ist die abwassertechnische Anlage durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- die Absetzbecken und das Pumpwerk (bzw. das Kombinationsbauwerk) sind in offener Bauweise ausgeführt und die Zu- und Ablaufrohre der Absetzbecken (kleine und große Vorklärung) befinden sich auf gleicher Höhe,
- das Abwasser wird vom Pumpwerk auf die Höhe der Bodenfilter gehoben und durchläuft die Anlage ab hier im freien Gefälle,
- die Rezirkulation ist nicht hydraulisch vom Ablauf entkoppelt und somit nur schwer regulierbar,
- eine sequentielle Betriebsweise der Bodenfilter ist nicht möglich,
- die meisten Anlagenkomponenten befinden sich im Bereich schwankender Grund- bzw. Moorwasserspiegel.

Nachfolgend werden die Auswirkungen dieser Randbedingungen auf den Versuchs- und Regele-betrieb der Pilotanlage erläutert.

Das Kombinationsbauwerk stellt einen Kompromiss aus dem ursprünglich vom Ingenieurbüro IGS geplanten Vorklärbecken und den von der BUW gegebenen Empfehlungen dar<sup>1</sup>. Es ist in drei Abschnitte unterteilt, wobei die Absetzbecken wahlweise genutzt werden können, so dass entweder 10,5 m<sup>3</sup> oder 60 m<sup>3</sup> Nutzvolumen zur Verfügung stehen. Die

große Vorklärung ist auf die Mitbehandlung der auf der gegenüberliegenden PWC-Anlage Jalm anfallenden Abwässer ausgelegt, woraus sich das ungewöhnlich große Volumen ( $V = 60 \text{ m}^3$ ) ergibt. Die Vorklärung ist also um das Doppelte größer als für die mechanische Vorbehandlung der an PWC-Anlagen anfallenden Abwässer notwendig. Die Übertragbarkeit der in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des Absetzbeckens getroffenen Aussagen auf andere Standorte ist somit nur eingeschränkt möglich.

Das Bauwerk ist zudem in offener Bauweise ausgeführt und nur mit Gitterrosten abgedeckt. Im Sommer können somit Geruchsprobleme auftreten, im Winter besteht die Gefahr des Einfrierens einzelner Anlagenteile. Das eindringende Niederschlagswasser stellt für den Versuchsbetrieb ein Problem dar, weil es die Verhältnisse in der Vorklärung beeinflusst und somit die beobachteten Veränderungen in Frage stellt. Für den Regelbetrieb ist von Bedeutung, dass die Zu- und Ablaufrohre der Absetzbecken auf gleicher Höhe angeordnet sind<sup>2</sup>. Aufgrund des zu erwartenden hohen Grobstoff- und Toilettenpapieranfalls muss mit Verstopfungen im Zulaufbereich gerechnet werden, die zum Rückstau führen können.

Bezüglich der biologischen Abwasserbehandlung stellen die Konstruktion der Bodenfilter sowie deren Betriebsweise eine Besonderheit dar. Von grundsätzlicher Bedeutung ist, dass das zu behandelnde Abwasser die Anlage im freien Gefälle durchläuft. Die stoßweise Beschickung wird durch einen Ni-

1 empfohlen wurden 2 Rundbecken: ein kleines Becken mit  $V = 10 \text{ m}^3$ , welches auch als Sieb-/Hydrolyseschacht betreiben werden kann und ein großes Becken mit  $V=33 \text{ m}^3$  (vgl. Bild 2-2)

2 Die BUW hatte eine Höhendifferenz von mindestens 300 mm empfohlen. Nach DIN 4261-1 hätte der Höhenunterschied mind. 100 mm betragen müssen [DIN 4261-1:2010-10, 2010].



**Bild 2-8:** Unzureichende Abwasserverteilung auf den Bodenfiltern

veuschalter im Pumpenschacht und somit abhängig vom Füllstand ausgelöst (ein: 58 cm, aus 38 cm), wobei jeweils 1,2 m<sup>3</sup> Abwasser gefördert werden. Die wahlweise Beschickung der Bodenfilter wird über Absperrschieber im zentralen Verteiler- und Sammelschacht gesteuert, die stromlos geschlossen sind. Entgegen den Vorschlägen der BUW können die Filtersegmente jedoch nicht in Reihe, d. h. hintereinander betrieben werden, weil Rezirkulation und Ablauf hydraulisch nicht entkoppelt sind. Eine Nachbehandlung zur Sicherstellung der Einlaufgrenzwerte ist somit nicht möglich, weshalb auch Versuche zur Ermittlung der Grenzbelastung entfallen mussten, wie sie zur Optimierung der Urinbehandlung vorgesehen waren.

Wie aus Bild 2-8 hervorgeht, ist die Abwasserverteilung trotz sternförmiger Anordnung der Verteilungsrohre suboptimal, weil nur ein Teil der Filterfläche benetzt und somit ausgenutzt wird. Zudem sind die Verteilungsrohre nur unzureichend gegen Witterungseinflüsse (Sonne, Wind) geschützt. Mittelfristig ist deshalb mit partiellen Kolmationen (Verstopfungen der Filter) und somit Grenzwertüberschreitungen zu rechnen.

Für das Einhalten von Grenzwerten im Ablauf ist auch die Rezirkulation (das Rückführen von behandeltem Abwasser) von großer Bedeutung: Einerseits findet dadurch eine Verdünnung des Rohabwassers statt; andererseits kann der Abbau von Stickstoff zumindest teilweise initiiert werden (Denitrifikation). Für den Regel- und den Versuchsbetrieb ist es daher wichtig, die richtigen Rezirkulationsverhältnisse zu kennen und ggf. einzustellen. Besonderes Merkmal der Rezirkulation auf der Pilotanlage ist aber, dass diese im freien Gefälle durch manuelle Einstellungen der Schieberöffnungen (wahlweise in den Zulauf oder den Pumpenschacht ohne Pumpen) erfolgen soll. Der Verzicht von Pumpen bzw. einer Zwangsteuerung der Schieber schränkt aber die Variations-

möglichkeiten der Rezirkulation erheblich ein und stellt darüber hinaus ein schwer zu kalkulierendes Betriebsrisiko dar. Wird der Rezirkulationstrom zu klein gewählt besteht die Gefahr, dass Grenzwerte im Anlagenablauf überschritten werden. Wird der Rezirkulationsstrom zu groß gewählt (Schieber geöffnet), fließt zu viel Wasser in das Pumpwerk und die Pumpen werden überlastet (Anlage läuft im Kreis, Gefahr des Absaufens).

Auf die Rezirkulation im Rahmen des Pilotvorhabens wurde letztlich aber auch deshalb verzichtet, weil es trotz erfolgter Nachbesserungen zu Grundwasser-eintritt in den Rezirkulationsschacht kam. Für den Fortgang der Pilotversuche war der Zutritt von Grundwasser in den Rezirkulationsschacht in zweierlei Hinsicht von Bedeutung. Zum einen konnte die Durchflussmessung nicht wie gewünscht durchgeführt werden, weil entweder das zufließende Grundwasser mit erfasst oder der Durchflussmesser überspült worden wäre. Zum anderen hätte der unkontrollierte Grundwasserzufluss zu einer rechnerisch nicht zu kompensierenden Verfälschung der erhobenen Messwerte geführt. Auch in den Messschacht drang Grundwasser ein, weswegen das hier installierte Durchflussmessgerät lange Zeit nicht in Betrieb gehen konnte (Bild 2-1). Aufgrund der Undichtigkeiten in Rezirkulations- und Messschacht musste letztlich eine Bilanzierung der Wasser- und Stoffflüsse entfallen.

Nachrichtlich sei an dieser Stelle ergänzt, dass das zulaufende Grundwasser durch sehr hohe CSB-Konzentrationen (Tabelle 2-2) sowie eine deutliche Braunfärbung (vgl. Bild 2-9) gekennzeichnet war. Beides ist für Grundwasser aus Mooren typisch, wie es auch am Standort der PWC-Anlage Jalmer Moor anzutreffen ist.

Generell ist das Einleiten von Grundwasser in eine Kläranlage nicht zulässig und dürfte auch im speziellen Fall der PWC Jalmer Moor nicht im Interesse der Wasserbehörde sowie des Betreibers sein. Insbesondere der möglicherweise sehr hohe Anteil an schwer abbaubaren, organische Verbindungen (z. B. Huminsäuren) ist als kritisch anzusehen, weil sie die Konzentration an nicht abbaubaren (refraktärem) CSB in der Anlage erhöhen, die Ablaufwerte verschlechtern und letztlich Grenzwertüberschreitungen zur Folge haben können.

#### 2.4.3 Online-Messtechnik und Feldlabor

Einen Überblick über das geplante und tatsächliche umgesetzte Messstellenkonzept gibt Bild 2-11. Demnach wurde die ursprüngliche Planung nur teil-



Bild 2-9: Eintritt von Grundwasser in den Rezirkulationsschacht (links) und Messschacht (rechts)



Bild 2-10: Datenlogger (links) und Feldlaborcontainer (rechts) auf der Pilotanlage

Analyse vom → Parameter ↓	29.10.2015	12.11.2015	10.12.2015	21.06.2016
CSB [mg/l]	318	403	225	265
BSB <sub>5</sub> [mg/l]	18	12	5	n.b.*
NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	14	6	2,6	2,7
NO <sub>3</sub> -N [mg/l]	57	19	4,5	0,1
NO <sub>2</sub> -N mg/l]	11	3	0,1	3,3
PO <sub>4</sub> -P [mg/l]	n.b.*	2	0,4	0,5
* nicht bestimmt				

Tab. 2-2: Analyse des in den Rezirkulations- und Messschacht eindringenden Grundwassers

weise umgesetzt – insbesondere im Hinblick der bauseits vorgesehenen Messstellen. Die Füllstandsmessung im Urinspeicher wurde aus Kostengründen ausgesetzt und auch die ersatzweise installierte Ultraschallpegelmesssonde erwies sich als unbrauchbar. Die Durchflüsse in der Rezirkulation und im Ablauf (MID im Messschacht) konnten infolge baulicher und technischer Unzulänglichkeiten letztlich nicht dokumentiert werden.

Die zur Fernüberwachung des Anlagenbetriebes notwendige Online-Messtechnik wurde von der BUW beschafft und an drei verschiedenen Messstellen auf der Kläranlage installiert. Im Ablauf der Vorklärung und im Ablauf der Kläranlage kamen Online-Messsonden der Firma S::can zum Einsatz, die Trübung, pH-Wert, Redoxpotential, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Ammoniumstickstoffgehalt quasikontinuierlich messen. Der Nieder-

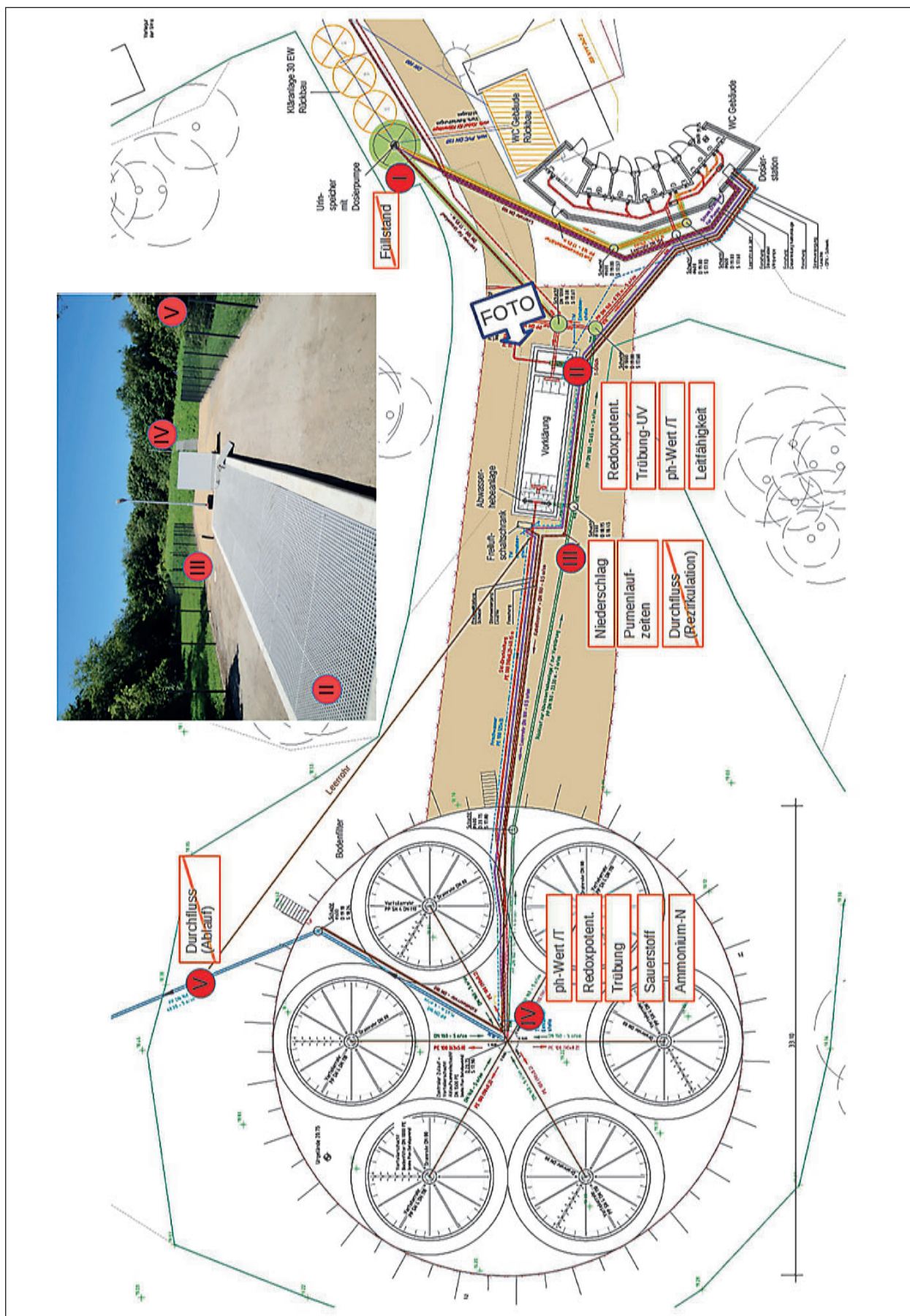


Bild 2-11: Geplante und tatsächlich installierte Online-Messtechnik auf der Pilotanlage





Bild 2-12 Zählstelle auf der Auffahrtsrampe zur PWC Anlage Jalmer Moor

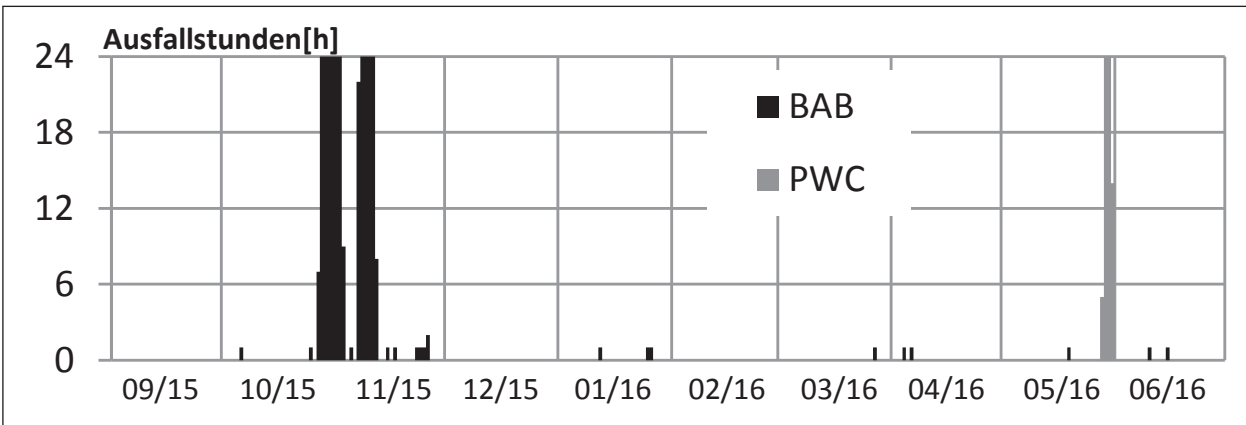


Bild 2-13: Störungen in der Datenaufzeichnung der Dauerzählstellen

schlag wurde mit einer Kippwaage (Firma R.M. Young) registriert. Die Datenaufzeichnung war seit dem 30.09.2015 in Betrieb. Bis zum 10.12.2015 – dieser Tag markiert das Ende der Untersuchungen an der kleinen Vorklärun- betrug das Messintervall für alle Sonden betrug 10 min; anschließend wurde es auf 30 min verlängert. Alle Daten wurden in einem Datenlogger (Con::cube, Firma S::can) erfasst und nach Weimar fernübertragen. Zusätzlich wurde ein mobiles Feldlabor errichtet, welches für die einfache Analytik der Abwasserproben ausgestattet war (physikalische Schlammkennwerte und Küvettentests).

**2.4.4 Dauerzählstellen**

Der Verkehr auf der BAB A7 wurde mittels Dauerzählstelle am Standort Schuby erhoben (Stundenwerte mit Erfassungsart 8+1). Da sich zwischen PWC-Anlage und Zählstelle keine weiteren Auf-

und Abfahrten befinden entsprechen die erhobenen Daten der Situation im Abschnitt der PWC-Anlage. Zusätzlich wurde in der Auffahrtsrampe zur PWC-Anlage ein Radarmessgerät installiert (im Leitpfosten, siehe Bild 2-12), so dass der auf die PWC-Anlage auffahrende Verkehr erfasst werden konnte. Die Daten der Dauerzählstellen wurden beim LBV-SH gespeichert und auf Nachfrage an die BUW zur Auswertung weitergeleitet.

Zu erwähnen ist, dass die Geräte bzw. Messstationen nicht exakt die gleichen Fahrzeugarten zählten. So wurden Sonderfahrzeuge nur von der Dauerzählstelle auf der BAB erfasst, während das Radarmessgerät auf der PWC-Anlage zusätzlich nicht klassifizierbare Kfz (nkIKFZ), Fahrrad und verdeckte Kfz (vdKfz) detektierte.

Das Radarmessgerät auf der PWC-Anlage wurde von der RTB GmbH & Co. KG (RTB) errichtet und war seit 24.07.2015 in Betrieb. Am 17.12. 2015 wur-

de das Gerät jedoch ausgetauscht, weil die Detektionsereignisse nicht plausibel waren. Prinzipiell ist somit eine Auswertung für den Zeitraum 18.12.2015 -30.06.2016 möglich. Allerdings traten auch in diesem Zeitraum Störungen an den Dauerzähstellen auf (Bild 2-13), so dass nur ein Teil der Daten zur Auswertung kommen kann. Die manuelle Fahrzeugzählung auf der PWC-Anlage am 18.05.2016 zeigte zudem die Notwendigkeit für nachträgliche Korrekturen der Datensätze vom Radarmessgerät auf, was bei den Ergebnissen erläutert wird (vgl. Kapitel 4.2).

### 3 Untersuchungen an der Pilotanlage Jalmer Moor

Das vom 17.07.2015 bis 22.06.2016 an die Möglichkeiten der Pilotanlage angepasste Untersuchungsprogramm gliederte sich schließlich in 4 Phasen mit unterschiedlichen Schwerpunkten (Bild 3-1):

1. Untersuchungen zum Schichtenaufbau und der Schwimmschlammdecke im kleinen Absetzbecken bzw. in der kleinen Vorklärung,
2. Eignungstest eines Bogensiebes als mögliche Verfahrensalternative zum konventionellen Absetzbecken,
3. Auswirkungen der Urinseparation auf die biologische Abwasserbehandlung,
4. Dokumentation und Fernüberwachung des Anlagenbetriebs.

Zudem wurden die Daten zur Fahrzeugzählung sowie zum Nutzerverhalten auf der PWC-Anlage ausgewertet, soweit die Daten vorlagen.

Nachfolgend werden Ziele, Methoden und Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen vorgestellt und diskutiert.

#### 3.1 Schichtenaufbau und Schwimmschlammdecke im kleinen Absetzbecken

##### 3.1.1 Hintergrund und Ziele der Messkampagne

Der hohe Anteil von Toilettenpapier und anderen Feststoffen im Abwasser von PWC-Anlagen stellt erhöhte Anforderungen an deren mechanische Vorreinigung – insbesondere dann, wenn die nachfol-

Anlagenbetrieb	2015						2016						
	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07
Kleines Absetzbecken	①												
Großes Absetzbecken							②						
Bogensieb							③						
Urinseparation							④						
Fernüberwachung	④												

Tab. 3-1: Anlagebetrieb und Untersuchungsschwerpunkte im Überblick

gende biologische Behandlung der Abwässer über Bodenfilter (Pflanzenkläranalgen) stattfinden soll. Denn der Eintrag von Grob- und Feststoffen auf bzw. in den Bodenfilter kann ansonsten zu Kolmationserscheinungen des Bodenfilters und damit gravierenden Betriebsstörungen führen.

Prinzipiell stehen für die mechanische Abtrennung von partikulären Stoffen aus dem Abwasser zahlreiche Verfahren mit unterschiedlichem Technisierungsgrad und Leistungsvermögen zu Verfügung, doch kommen bislang ausnahmslos Absetzanlagen mit ebener Sohle in Form von Einkammer- und Mehrkammerabsetzgruben zur Anwendung. Vorteile gegenüber allen anderen Verfahren sind die vergleichsweise einfache Herstellung und Handhabung sowie ein geringer Wartungsaufwand, was letztlich zu geringen Bau- und Betriebskosten führt.

Grundsätzlich nimmt die Abscheideleistung der Absetzanlagen im Verhältnis zur ihrem Volumen, respektive der Anzahl an abgetrennten Kammern zu. Konsequenterweise müssen Absetzanlagen für die Abwässer von PWC-Anlagen größer bemessen werden, als es für häusliches Schmutzwasser notwendig wäre. Die Bemessung von Absetzgruben erfolgt im kommunalen Abwasserbereich nach DIN 4261, Kleinkläranlagen – Teil 1: Anlagen zur Schmutzwasservorbehandlung. Für PWC-Anlagen werden die Hinweise zur Auslegung im Arbeitsblatt DWA-A 262 sowie Merkblatt DWA M 279 gegeben.

Mit der hydraulischen Aufenthaltszeit erhöht sich der mikrobiologische Abbau der zurückgehaltenen Feststoffe, denn viele der partikulären organischen Abwasserinhaltsstoffe werden unter anaeroben Bedingungen zu Methan und Kohlendioxid umgewandelt. Die überwiegend im Bodenschlamm produzierten Gase können sich an Feststoffpartikel mit guter Oberflächenbenetzbarkeit haften und diese bis zur Wasseroberfläche mitführen (Flotation). Infolgedessen kann sich eine Schwimmschlammdecke ausbilden, die speziell in Absetzgruben von PWC-Anlagen eine sehr hohe Mächtigkeit (> 10



**Bild 3-1:** Handmesssonden (links), Schlamm Spiegelrohr (Mitte) und Schlamm Spiegelhöhe (rechts)

cm) und Festigkeit (Feststoffgehalte > 12 %, z.T. stichfeste Konsistenz) erreicht und somit insbesondere bei der turnusgemäßen Schlamm entsorgung ein nicht zu unterschätzendes Problem darstellt: Wenn das Material nicht pumpfähig ist, wird es schlichtweg nicht entsorgt. Schlimmstenfalls wird die Schwimmschlammdecke dann lediglich punktuell zerstört und nur das darunter befindliche Trübwasser abgepumpt, obschon genau dieses vor Ort behandelt bzw. entsorgt werden könnte.

Ein wichtiges Ziel der Untersuchungen zur Optimierung konventioneller Absetzgruben war es deshalb, das Entstehen der Schwimmschlammdecke zu dokumentieren sowie die Entwicklung der im Absetzbecken bestehenden Verhältnisse zu beschreiben. Das Interesse galt hierbei der Profilmessung von Trübung (als Indikator für den Feststoffgehalt), pH-Wert, Leitfähigkeit und Temperatur über die Behältertiefe – insbesondere aber der Schlamm Spiegelhöhe. Im Ergebnis sollten Aussagen darüber getroffen werden, ob und wie sich die Schwimmschlammdecke ausbildet und an welcher Stelle die Wasserentnahme aus dem Absetzbecken sinnvollerweise erfolgen sollte.

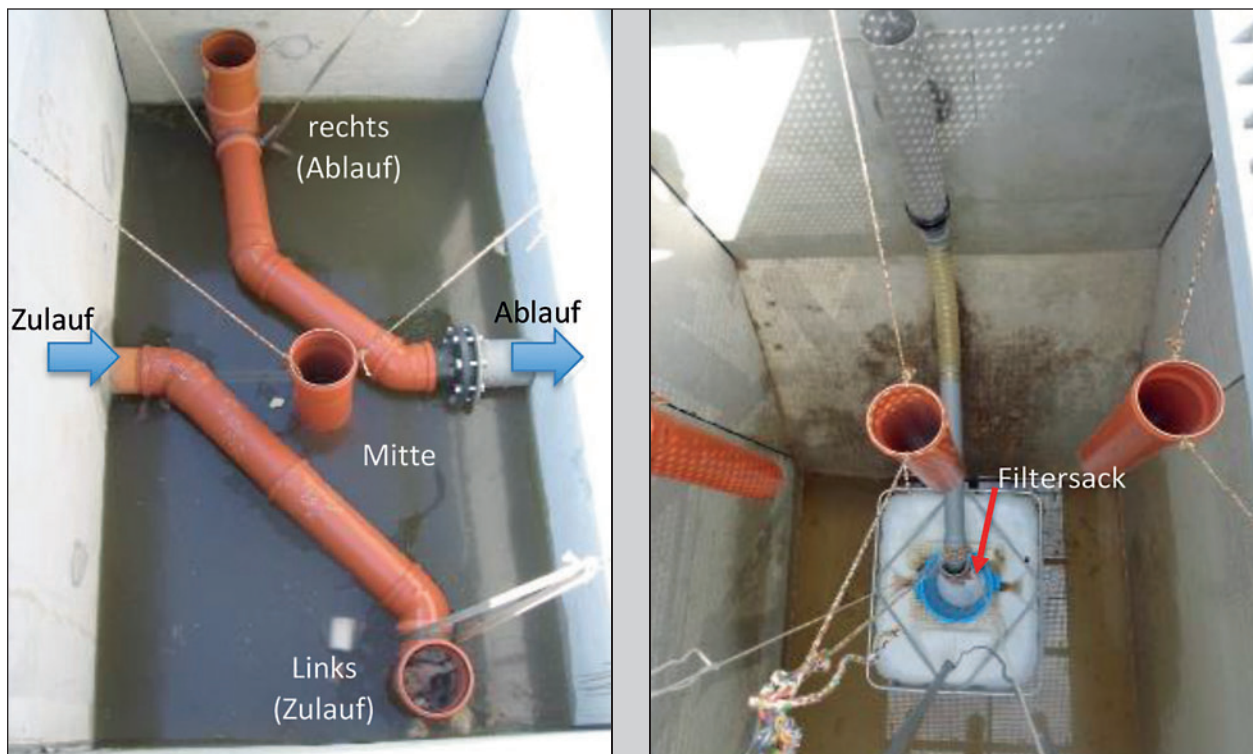
### 3.1.2 Vorbereitung und Durchführung der Messkampagne

Folgende Methoden kamen zur Anwendung, um Aussagen über die Entwicklung der Verhältnisse in der Vorklärung treffen zu können (Bild 3-2):

- Bestimmung der Parameter Trübung [NTU], Temperatur [ °C], Leitfähigkeit [µS/cm] und pH-Wert an den Messpunkten Zulauf (links), Mitte und Ablauf (rechts) in unterschiedlichen Behältertiefen (Oberfläche, 0,4 m, 0,8 m, 1,2 m, 1,6 m, 2,0 m 2,4 m und 2,8 m) mittels Handmessgerät wtw 3430,
- Bestimmung der Schlamm Spiegelhöhe [m] im Ablauf (MP3) mittel Schlamm Spiegelrohr sowie mittels Handmessgerät wtw 3430 (Ermittlung der Höhe bzw. Tiefe, bei der das Messgerät die Überschreitung des Messbereichs von 4.000 NTU anzeigt),
- Photographische Dokumentation der Schwimmschlammdeckenbildung.

Aufgrund der Abmessungen des kleinen Absetzbeckens (LxBxT=150x250x300 cm) hätte die Fließlänge weniger als 1,5 m betragen, da sich Zu- und Ablauf mittig auf der längeren Seite (und in gleicher Höhe) befinden. Um die zu erwartenden Kurzschlussströmungen im Becken zu vermeiden, wurden deshalb für die Untersuchungen zusätzliche Bögen an Zu- und Ablauf installiert und somit die Fließrichtung geändert. An den Enden der Bögen wurden T-Stücke angebracht, die ca. 1 m in das (Ab-)wasser tauchten. Zusätzlich wurde in der Mitte der Vorklärung ein Tauchrohr 1 m tief ins Wasser gehängt (Bild 3-2).

Die noch oben und unten offenen Tauchrohre ermöglichten es, die Handmesssonde und das



**Bild 3-2:** Konfiguration des kleinen Absetzbeckens: eingetauchte Rohre als Messpunkte (links) und Ablauf über Filtersack in IBC-Behälter mit Pumpe (rechts)

Schlammspiegelrohr trotz Schwimmschlammdecke in den Wasserkörper einzuführen. Sie markieren somit die drei Messpunkte der Untersuchung. Der Ablauf der Vorklärung wurde durch ein flexibles Rohr über einen Filtersack in einen IBC-Container geführt, wo er gesammelt und von hier zur Hebeanlage gepumpt wurde.

Die Filtersäcke im Ablauf der Vorklärung wurden im Rahmen der Kontrollgänge (zweimal pro Woche) gewechselt, wenn ein freier Durchfluss offensichtlich behindert wurde und ein Überlaufen zu befürchten war. Die benutzten, d. h. gefüllten Filtersäcke wurden in Transportboxen vor Ort im Feldlabor gelagert und später ins Labor der BUW überführt. Hier wurden die Filtersäcke bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und letztlich die Trockenmasse der Filtrerrückstände sowie deren Glühverlust (organischer Anteil) bestimmt. Die Filtersäcke hatten zunächst eine Maschenweite von 200 µm, doch neigten diese schnell zu verstopfen. Ab dem dritten Wechsel kamen deshalb Filtersäcke mit 500 µm Maschenweite zum Einsatz.

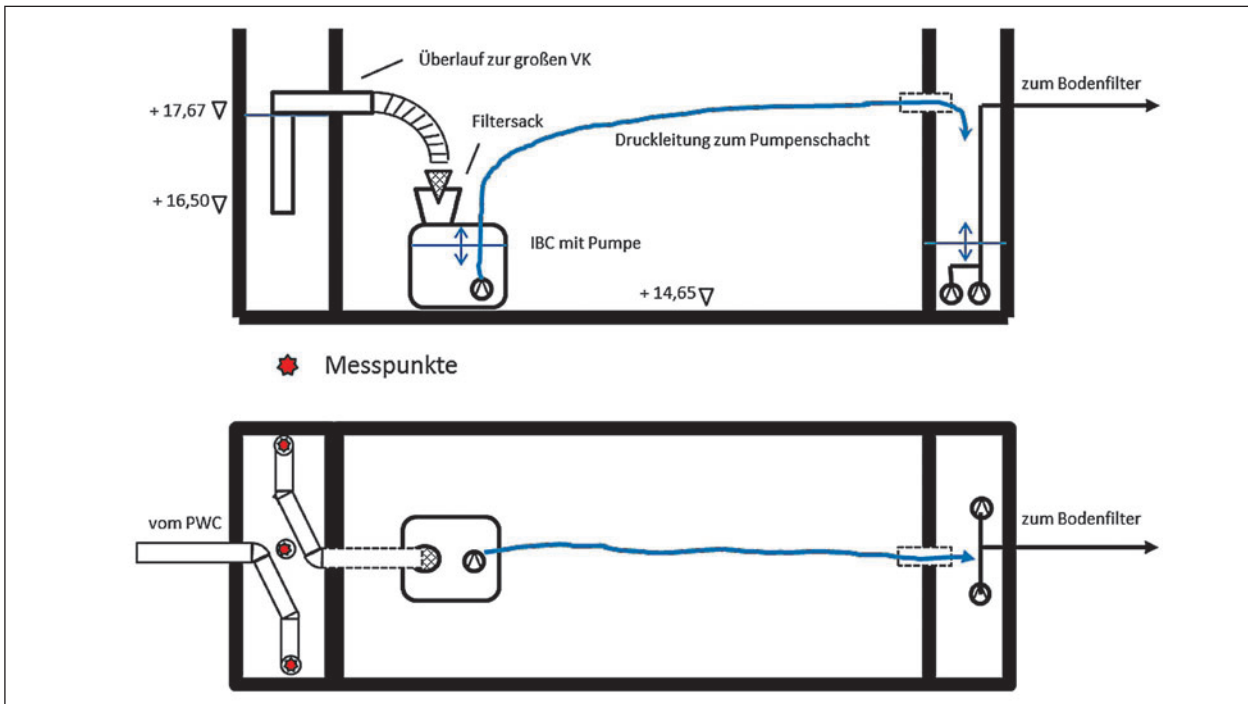
### 3.1.3 Entwicklung von Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert

Auf dem Bild 3-4 sind die mit dem Handmessgerät an den drei Messpunkten (Links, Mitte, Rechts) in

den jeweiligen Behältertiefen aufgenommenen Ganglinien für Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert dargestellt.

Anhand der Temperaturverläufe wird zunächst die Abkühlung an allen drei Messpunkten sowie in allen Tiefen ab etwa Anfang September deutlich. Offensichtlich ist die (Ab-)wassertemperatur in der Vorklärung aufgrund ihrer offenen Bauweise stark von der Umgebungstemperatur abhängig. So erklärt sich auch die Schichtung in der relativ warmen Jahreszeit zu Beginn der Untersuchung (wärmste Schicht oben, kälteste unten), die insbesondere am rechten Messpunkt (Ablauf) gut zu erkennen ist. Auch für die elektrische Leitfähigkeit, die den Gehalt an ionischen Bestandteilen im Wasser beschreibt und somit ein indirektes Maß für den Salzgehalt ist, konnte an allen Messpunkten zunächst eine Schichtung beobachtet werden (salzhaltige Schicht unten). Wie bei den Temperaturen egalisierten sich aber die Unterschiede in den Schichten mit andauernder Betriebszeit, was auf eine mehr oder weniger stetige Durchmischung schließen lässt.

Die pH-Werte betrachtend ist hingegen eine klare Zonierung über die Behältertiefe festzustellen – zumindest an den Messpunkten in der Mitte und Rechts (Ablauf) der Vorklärung. Am Boden stellen sich bereits nach ca. 4 – 6 Wochen infolge des



**Bild 3-3:** Versuchsaufbau und -betrieb zur Messkampagne im kleinen Absetzbecken

anaeroben Abbaus organischer Substanzen<sup>3</sup> pH-Werte zwischen 5 und 6 ein. Noch oben steigen die pH-Werte auf einen für urinhaltige Abwässer typischen Bereich<sup>4</sup> zwischen 8 und 9 an. Zwar ist der pH-Wert in den Schichten über die Zeit gewissen Schwankungen unterworfen, doch bleibt das Tiefenprofil (unten sauer, oben basisch) charakteristisch.

Festzustellen bleibt, dass sich die anfänglichen Unterschiede für Temperatur und elektrische Leitfähigkeit in den einzelnen Schichten über längere Zeiträume ausgeglichen haben, während für die pH-Werte das Gegenteil der Fall war. Anfänglich waren keine Unterschiede im pH-Wert zu identifizieren, doch bildete sich mit der Zeit eine dauerhafte Zonierung aus. Diese Verhältnisse traten umso deutlicher in Erscheinung, je weniger Kräfte von au-

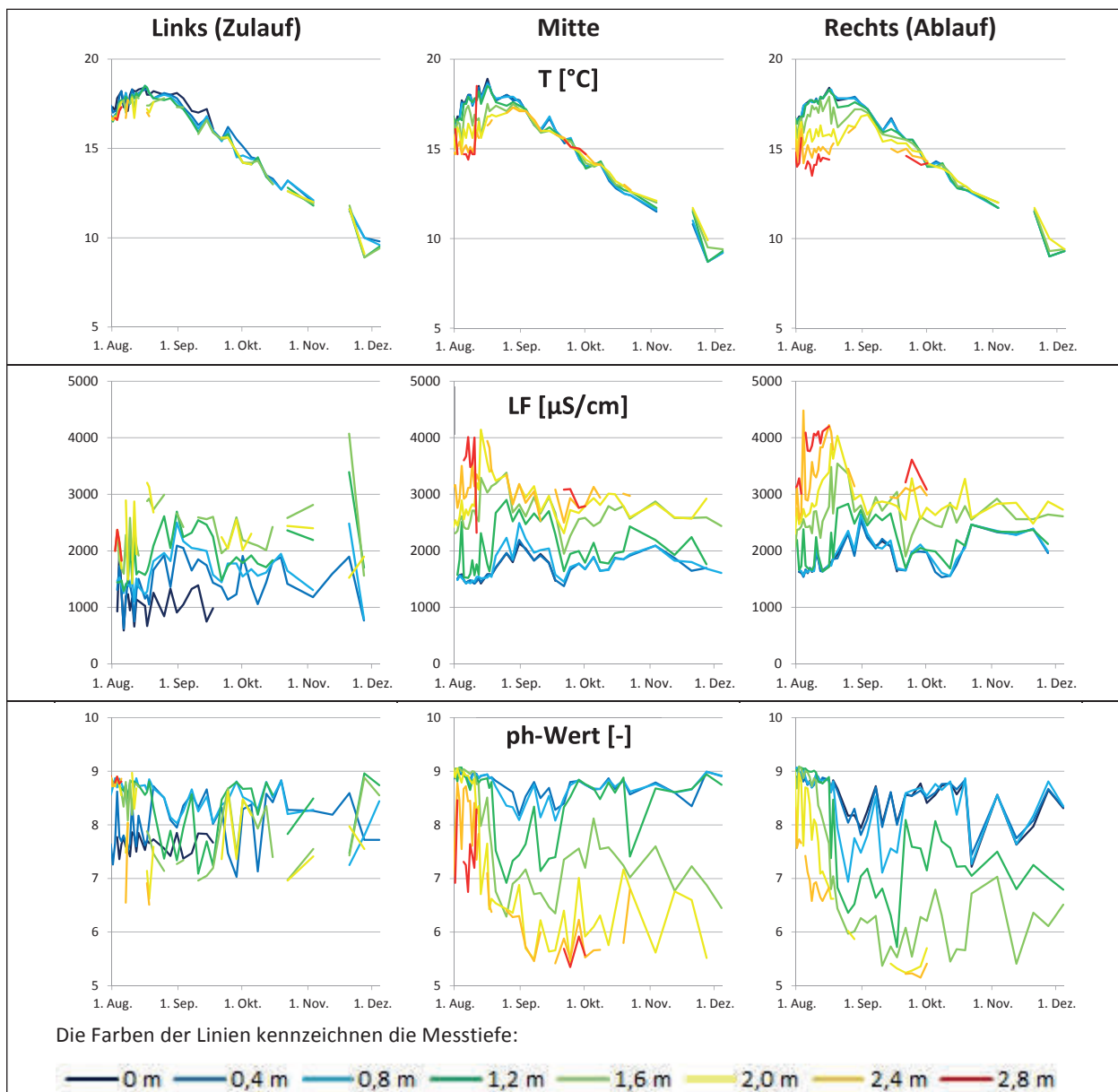
3 Der anaerobe Abbau lässt sich in die vier Abbauschritte 1. Hydrolysephase, 2. Versäuerungsphase, 3. Acetogene Phase und 4. Methanogene Phase unterteilen. In der Hydrolysephase werden die ungelöste Polymere in gelöste Bruchstücke überführt, die dann in der Versäuerungsphase in Alkohole,  $H_2$ ,  $CO_2$  und kurzkettige organische Säuren umgewandelt werden. Letztere können sich im Schlamm anreichern, was in Abhängigkeit der Pufferkapazität des Wassers eine Abnahme des pH-Wertes zur Folge hat.

4 Bereits in den urinableitenden Rohren wird der Harnstoff im Urin durch Enzyme (Urease) zu Ammoniak hydrolysiert ( $CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow CO_2 + 2 NH_3$ ), der in Abhängigkeit von der Ammoniakkonzentration bzw. pH-Wert, Temperatur und Druck mehr oder weniger zu Ammonium dissoziiert ( $NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-$ ;  $pK_s = 9,2$ ).

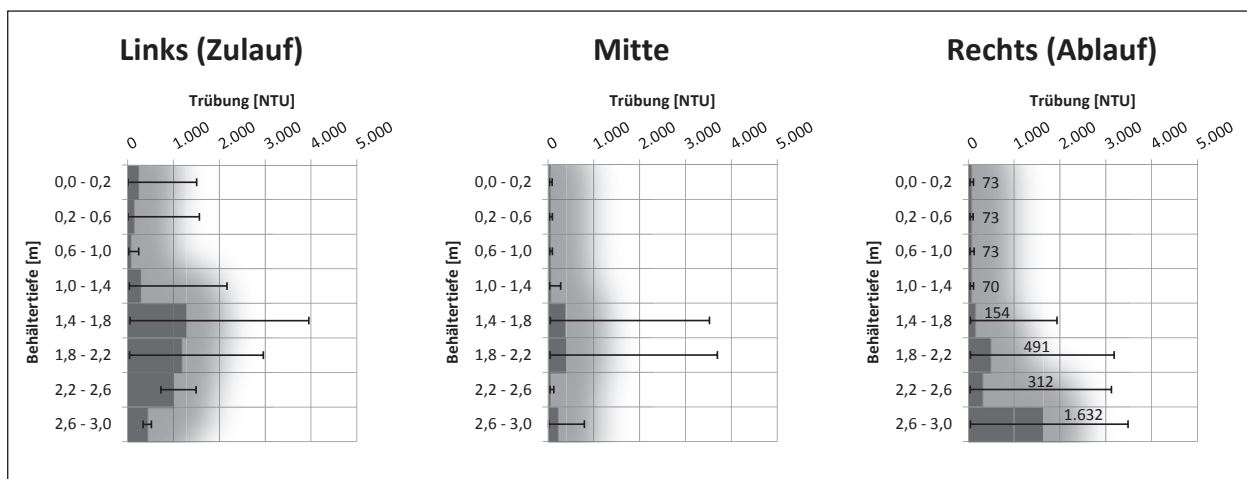
ßen auf den Wasserkörper wirkten. Im Umkehrschluss verhinderten hydraulische und stoffliche Stoßbelastungen im Zulaufbereich, dass sich auch hier (an der linken Messstelle) konstante Verhältnisse einstellen.

### 3.1.4 Schichtenprofile für Trübung bzw. Feststoffgehalte

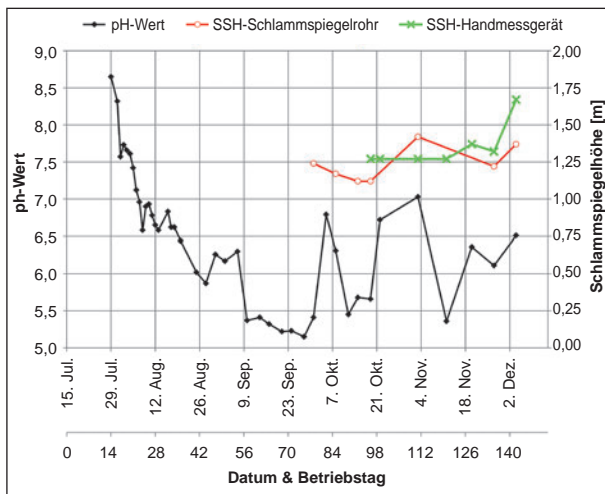
Anhand der Trübungsmessung können qualitative Aussagen zum Feststoffgehalt im Absetzbecken über die Behältertiefe getroffen werden. Diesbezüglich gibt Bild 3-5 Auskunft, wobei nicht die Ganglinien, sondern die Mittelwerte (Balken) und Streubreiten (Spannweitenlinien) der Messungen in den Schichten angegeben werden. Demnach war zumindest am rechten Messpunkt (Ablauf) der zu erwartende Schichtenaufbau eingetreten: Die Trübungen, respektive die Feststoffgehalte, waren am Boden am größten und nahmen nach oben hin ab. Die feststoffreiche Eindickzone erreichte am Ende der Versuchsphase eine Mächtigkeit von ca. 1,5 m, was 50 % der Behälterhöhe bzw. -tiefe entspricht. Darüber befand sich die feststoffarme Trübwasserzone von ebenfalls etwa 1,5 m Höhe. Dieser Schichtenaufbau ist im Zulauf und in der Mitte der Vorklärung nicht gegeben, d. h. die Phasenseparation (Abtrennung partikulärer Stoffe) nimmt entlang des Fließweges zu. Demnach ist ein ausreichender horizontaler Abstand von Zu- und Ablaufleitung erforder-



**Bild 3-4:** Entwicklung von Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert an unterschiedlichen Messstellen (Links, Mitte, Rechts) und Messtiefen (0-2,8 m) im Absatzbecken



**Bild 3-5:** Schichtenaufbau der Trübung (als Indikator für den Feststoffgehalt) im Vorklärbecken



**Bild 3-6:** Verlauf der Schlammspiegelhöhen an den Messpunkten in der Vorklärung

lich, wenn möglichst viele Feststoffe in der Vorklärung zurückgehalten werden sollen. Diese Erkenntnis ist für große Vorklärbecken keineswegs neu, für relativ kleine Absetzanlagen wie auf der PWC Jalmor Moor indes schon.

Auch die Frage nach der optimalen Abzugshöhe kann anhand des am rechten Messpunkt (Ablauf) dokumentierten Schichtenaufbaus beantwortet werden. Prinzipiell sollte der Abzug dort erfolgen, wo der Feststoffgehalt am geringsten ist. Dieser Punkt liegt in der Trübwasserzone zwischen Bodenschlamm und Schwimmschlamm. Anhand der in Bild 3-5 angegebenen Mittelwerte lässt sich nachvollziehen, dass bei den Messungen in 1,2 m Tief (repräsentativ für die Schicht 1,0 -1,4 m) die niedrigsten Trübungswerte ermittelt wurden. Der Abzug des Abwassers sollte also in dieser Tiefe erfolgen, weil hier die geringsten Feststoffkonzentrationen zu erwarten sind. Damit sind die Ergebnisse anderer von der BUW durchgeführten Untersuchungen bestätigt und die für den Versuchsaufbau gewählte Konstruktion (Entnahmetiefe 1,17 m) erweist sich im Nachhinein als richtig.

### 3.1.5 Schlammspiegelhöhen und pH-Werte im Ablaufbereich

In Bild 3-6 ist die Entwicklung des pH-Wertes im Bodenschlamm sowie des Schlammspiegels (Schlammspiegelhöhe – SSH) für den Messpunkt im Ablauf der Vorklärung dargestellt. Deutlich ist die Abnahme des pH-Wertes zu erkennen, die nach 14 Tagen einsetzte und somit den Beginn des anaeroben Abbaus kennzeichnet. Innerhalb von 50 Tagen fiel der pH-Wert auf  $\text{pH} = 5,15$  ab, wobei die Versäu-

erung etappenweise abließ und offensichtlich infolge des Kohlensäure-Bikarbonat-Gleichgewichtes ( $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ ;  $\text{pKs} \sim 6,4$ ) gepuffert wurde.

Der an die Versäuerung anschließende Anstieg des pH-Wertes zeigt den Beginn des nun einsetzenden Prozesses der Methanbildung an. Auch der ab dem 41. Betriebstag deutlich sichtbare Schwimmschlamm in der Vorklärung lässt diesen Schluss zu. Demnach hatten sich zu diesem Zeitpunkt ausreichend acetogene und methanogene Bakterien etabliert und der anaerobe Abbau organischer Substanz konnte vollständig ablaufen. Die in der Folge zu beobachtenden Schwankungen im pH-Wert lassen jedoch die Instabilität des Abbauprozesses erkennen, deren Ursache in einer – zumindest zeitweise – gestörten Acetogenese und/oder Methanogenese zu suchen ist.

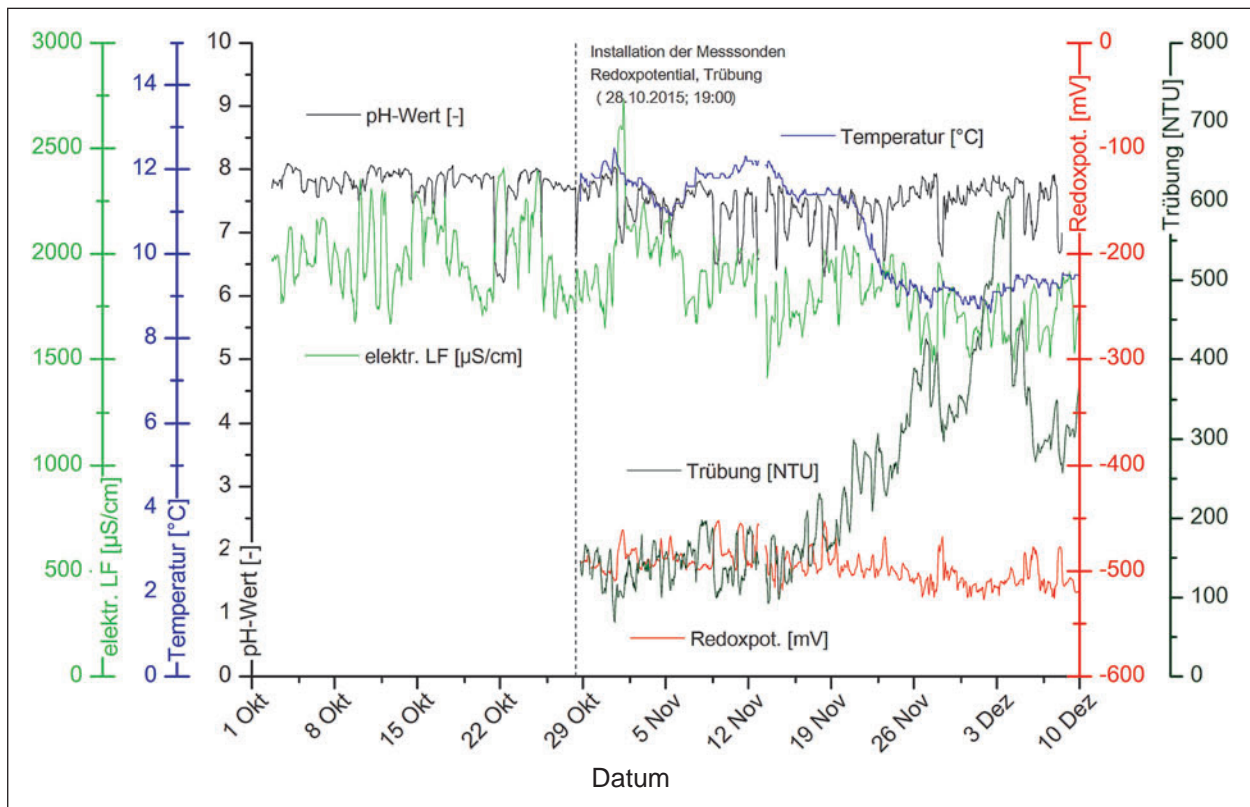
Auch anhand der dokumentierten Schlammspiegelhöhen (SSH) lässt sich der anaerobe Abbau von Schlamm nachvollziehen, denn trotz kontinuierlicher Nachlieferung von Feststoffen in die Vorklärung blieb die Schlammspiegelhöhe über lange Zeit nahezu unverändert.

Für ähnliche Untersuchungen an anderen Absetzbecken ist noch die Feststellung von Bedeutung, dass sowohl die konventionelle Messung mit Schlamm Spiegelrohr als auch die Messung mit Handmessgerät, bei der die Überschreitung des Messbereichs (4.000 NTU) die Höhe des Schlammspiegels signalisierte, zu diesem Ergebniskommen und somit als gleichwertig anzusehen sind.

### 3.1.6 Überwachung der Ablaufqualität

Zur Fernüberwachung der Ablaufqualität wurden unmittelbar neben dem Ablauf der Vorklärung die Messsonden für Redoxpotential, pH-Wert, elektrischer Leitfähigkeit, Temperatur und Trübung in einem zusätzlichen Tauchrohr platziert. Die Messsonden tauchten ca. 1 m in den Wasserkörper ein und repräsentierten somit die Verhältnisse am Auslauf des Vorklärbeckens. Die Entwicklung der aufgezichneten Parameter ist Bild 3-5 zu entnehmen.

Deutlich ist das Absinken der Temperatur Ende November zu erkennen. Bemerkenswert ist auch die Zunahme der Trübung, die Anfang Dezember mit 600 NTU einen Höchstwert einnahm und anschließend auf 300 NTU zurückging. Demnach war es also zu einem temporären Anstieg des Feststoffgehaltes gekommen. Auch die Schlammspiegelhöhe erreichte



**Bild 3-7:** Entwicklung relevanter Abwasserparameter im Ablauf der Vorklärung (stündliche Mittelwerte aus der Online-Messung mit Sonden am Messpunkt rechts in 1 m Tiefe)

zu diesem Zeitpunkt ihr Maximum (vgl. Bild 3-6). Grundsätzlich bestätigen die Online-Messdaten die Entwicklung der Verhältnisse am rechten Messpunkt der Vorklärung, wie sie unter Verwendung des Handmessgerätes resultierte. Aufgrund der wesentlich größeren zeitlichen Auflösung (Messintervall  $t = 10$  min) treten jedoch die temporären Schwankungen deutlicher hervor. Offensichtlich variieren die Parameter Redoxpotential, pH-Wert und Leitfähigkeit vor allem im Tages- und Wochenverlauf, während für die Temperatur und die Trübung zusätzlich ein längerfristiger Trend zu erkennen ist.

Um den Feststoffabtrieb aus der Vorklärung bilanzieren zu können, wurde der Ablauf der Vorklärung mit einem flexiblen Rohr über Filtersäck geführt (vgl. Bild 3-2 und Bild 3-3). Über den gesamten Zeitraum der Untersuchungsphase wurden sieben Filter ausgetauscht und analysiert. Anhand der Trockenmassen der Filterrückstände  $m_d$  [g] und der Einsatzdauer der Filter  $t_{\text{Filter}}$  [d] wurde auf einen durchschnittlichen, täglichen Feststoffabtrieb ( $m_d/t_{\text{Filter}}$ ) aus der Vorklärung geschlossen (Bild 3-9). Die Trockenmassen der Filterrückstände variierten dabei zwischen 7 und 42 g, die Einsatzdauer der Filter zwischen 7 Tagen (zum Anfang der Untersuchung) und 42 Tagen.

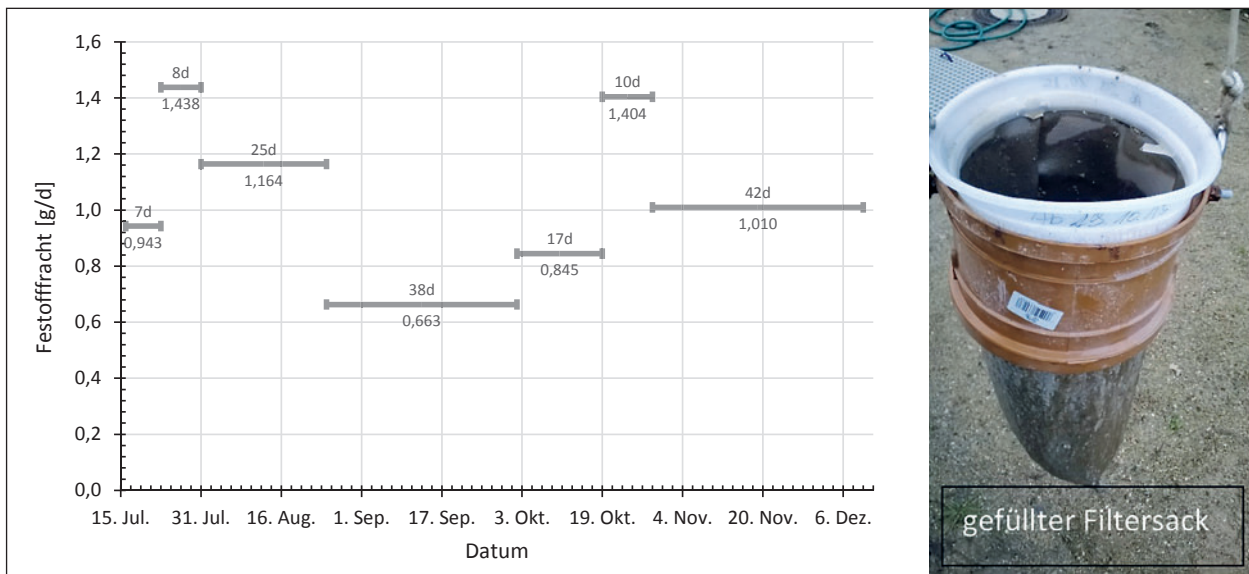
Wie aus Bild 3-8 zu entnehmen ist, wurden im Filtersack Feststofffrachten zwischen 0,7 g/d und 1,4 g/d zurückgehalten und folglich aus der Vorklärung ausgetragen. Bezogen auf den beobachteten Abwasseranfall von 4,3 bis 5,2 m<sup>3</sup>/d bedeutet dies eine Feststoffkonzentration im Bereich 0,1 bis 0,3 mg/l. Ein Leistungsvergleich mit anderen Verfahren an anderer Stelle ist zwar nicht möglich, weil die Maschenweite der verwendeten Filtersäcke mit 500 µm ein Vielfaches der Porenweite zur standardisierten Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe beträgt (z. B. DIN 38409-2: Membranfilter 0,45 µm, Glasfaserfilter 0,3 bis 1 µm). Die Methode scheint aber geeignet, um die Effektivität verschiedener Verfahren auch über längere Zeiträume dokumentieren und vergleichen zu können.

### 3.2 Schwimmschlammdeckenbildung

Die Entstehung der Schwimmschlammdecke in der Vorklärung geht aus Bild 3-9 hervor. Die mit den Fotos dokumentierten Beobachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In den ersten vier Wochen nach Inbetriebnahme schwammen lediglich Hygieneartikel (Kloppapier,





**Bild 3-8:** Mittlere Feststofffrachten im Ablauf der Vorklärung (Feststoffabtrieb)

Damenbinden) auf, die ganz offensichtlich aus dem Zulauf stammten.

- Am 27. Betriebstag waren vereinzelt Schlammagglomerate zu erkennen, die sich aus feineren Schlammpartikeln und den Hygieneartikeln formten.
- Nach etwa 6 Wochen Betriebszeit (41. Betriebstag) hatten sich die Schlammagglomerate über die Vorklärung verteilt und benetzen die Wasseroberfläche weiträumig.
- Nach ca. 7 Wochen (50. Betriebstag) kam es zu einer Differenzierung des Schwimmschlamm: Im Zulaufbereich reicherten sich die Schlammagglomerate mit dunkler Färbung und feiner Struktur an, im Ablaufbereich verschwanden sie.
- Nach etwa 9 Wochen hatte sich im Zulaufbereich eine durchgängig geschlossene Schwimmschlammdecke ausgebildet, die bis zum Ende der Untersuchung Bestand hatte.

Beim Umbau des mittlerweile aufschwimmenden Zulaufrohres am 120. Betriebstag zeigte sich, dass die Schwimmschlammdecke ca. 10 cm dick und nahezu stichfest war.

Insgesamt lassen die Beobachtungen den Schluss zu, dass die Schwimmschlammdeckenbildung prinzipiell über drei Schritte abläuft:

1. sofortiges Aufschwimmen von spezifisch leichten Grobstoffen (Toilettenpapier, Hygieneartikel wie Damenbinden und Tampons, sonstige Abfälle),

2. späteres Flotieren von Bodenschlamm durch Gasentwicklung bei vollständigem, anaeroben Abbau (Methanbildung)

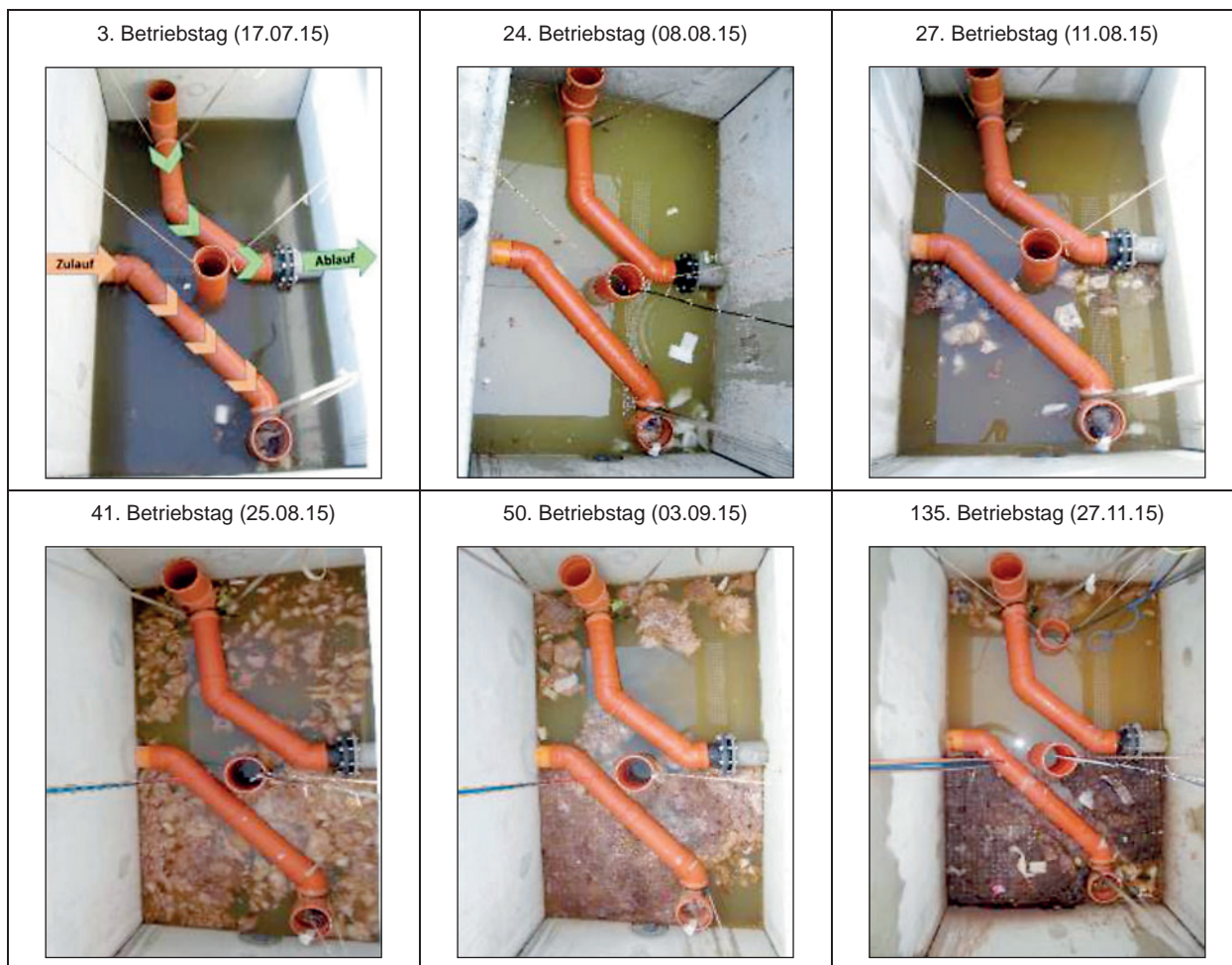
3. fortschreitendes Vernetzen der aufgeschwommenen Partikel zu größeren Verbänden (Agglomeration).

Als Ursache für die ungewöhnlich starke Schwimmschlammdecke im Absetzbehälter von PWC-Anlagen können die spezifische Abwassercharakteristik (hoch konzentrierte Abwässer mit einem hohen Anteil an Toilettenpapier und anderen Grobstoffen) sowie das vergrößerte Vorklärvolumen (Intensivierung der Faulprozesse durch verlängerte Aufenthaltszeiten) angesehen werden. Im Zulaufbereich tritt die Schwimmschlammdecke stärker in Erscheinung, weil es hier zu einer Anreicherung von organischem Material und folglich zu einer höheren Gasentwicklung im Bodenschlamm kommt.

### 3.3 Untersuchungen an einem Bogensieb als Ersatz für ein Vorklärbecken

#### 3.3.1 Hintergrund und Ziele des Eignungstests

Ziel der Untersuchungen zum Bogensieb war es zu zeigen, inwieweit diese Technik als verfahrenstechnische Alternative zu konventionellen Absetzanlagen als erste Stufe der Abwasserbehandlung zum Einsatz kommen könnte. Als wesentlicher Vorteil des Bogensiebes wurde seine bessere Leistungsfä-



**Bild 3-9:** Entwicklung der Schwimmschlammdecke in der kleinen Vorklärung

higkeit in Bezug auf den Rückhalt von partikulären Stoffen angesehene, was für die dauerhafte Funktionalität des nachgeschalteten Bodenfilters von großer Bedeutung ist (Kolmationsgefahr). Mit der Separation des frischen Abwassers über das Bogensieb sollte darüber hinaus eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung neuartiger Behandlungsverfahren und -konzepte geschaffen werden, welche die Betriebssicherheit der Abwasserentsorgung von PWC-Anlagen erhöhen und gleichzeitig deren Kosten senken können (weitergehende Abwasserreinigung durch Senkung der Belastung; energetische Verwertung des anfallenden Siebgutes).

Generell stellt aber der Einsatz eines Bogensiebes zur Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen ein Novum dar und ist deshalb mit vielen Unwägbarkeiten beim Bau und Betrieb verbunden. Praktisch liegen diesbezüglich keinerlei Erfahrungen vor. Als problematisch ist zum einen die spezifische Abwassercharakteristik anzusehen (geringer aber stark schwankender Abfluss sowie hoher Anteil von Toilettenpapier und sonstigen Grobstoffen). Denn aufgrund der

geringen Abwasserzuflüsse kann es zu Ablagerungen auf der Siebplatte kommen, die austrocknen und somit das Sieb verstopfen können. Zum anderen stellt die drucklose Beschickung im Freigefälle eine Herausforderung dar, weil sie die gleichmäßige Verteilung des Abwassers über die Siebfläche erschwert, die sowohl für eine hohe Abscheideleistung als auch Betriebssicherheit des Bogensiebes eminent wichtig ist. Festzustellen bleibt, dass neben dem Abscheidegrad (der durch Bilanzierung der Feststoffe im Siebdurchgang zu beurteilen ist) vor allem auch betriebliche Aspekte (Gefahr der Verstopfung, Rechengutanfall) wichtige Kriterien bei der Beurteilung des Bogensiebes sind.

### 3.3.2 Einbau und Betrieb von Bogensieb und Probenahmesystem

Der Test eines Bogensiebes als verfahrenstechnische Alternative zu konventionellen Absetzanlagen wurde vom 12.05.2016 bis 19.05.2016 durchgeführt. Das Bogensieb wurde mit zwei verschiede-

	11.05.16 Mittwoch	12.05.16 Donnerstag	13.05.16 Freitag	14.05.16 Samstag	15.05.16 Sonntag	16.05.16 Montag	17.05.16 Dienstag	18.05.16 Mittwoch	19.05.16 Donnerstag
<b>Betriebsphasen Bogensieb</b> (Zahlen geben die Phasen an)		12:00 1	14:30 2 20:00 3	09:00 4	19:00 5	16:00	17:00 6	08:00	
<b>Probenahmen</b> Siebdurchgang Filterrückstand Filtrat Siebgut Vorklärung Ablauf (MS)	○ ●	▼ ●	▼▼▼ ●●●●	▼▼▼ ●●●●	▼▼▼ ●●●●	▼▼▼ ●●●	▼ ○ ○ ● ●	▼▼▼ ○ ● ● ●	▼

Tab. 3-2: Betriebsphasen des Bogensiebes und Untersuchungsprogramm im Überblick

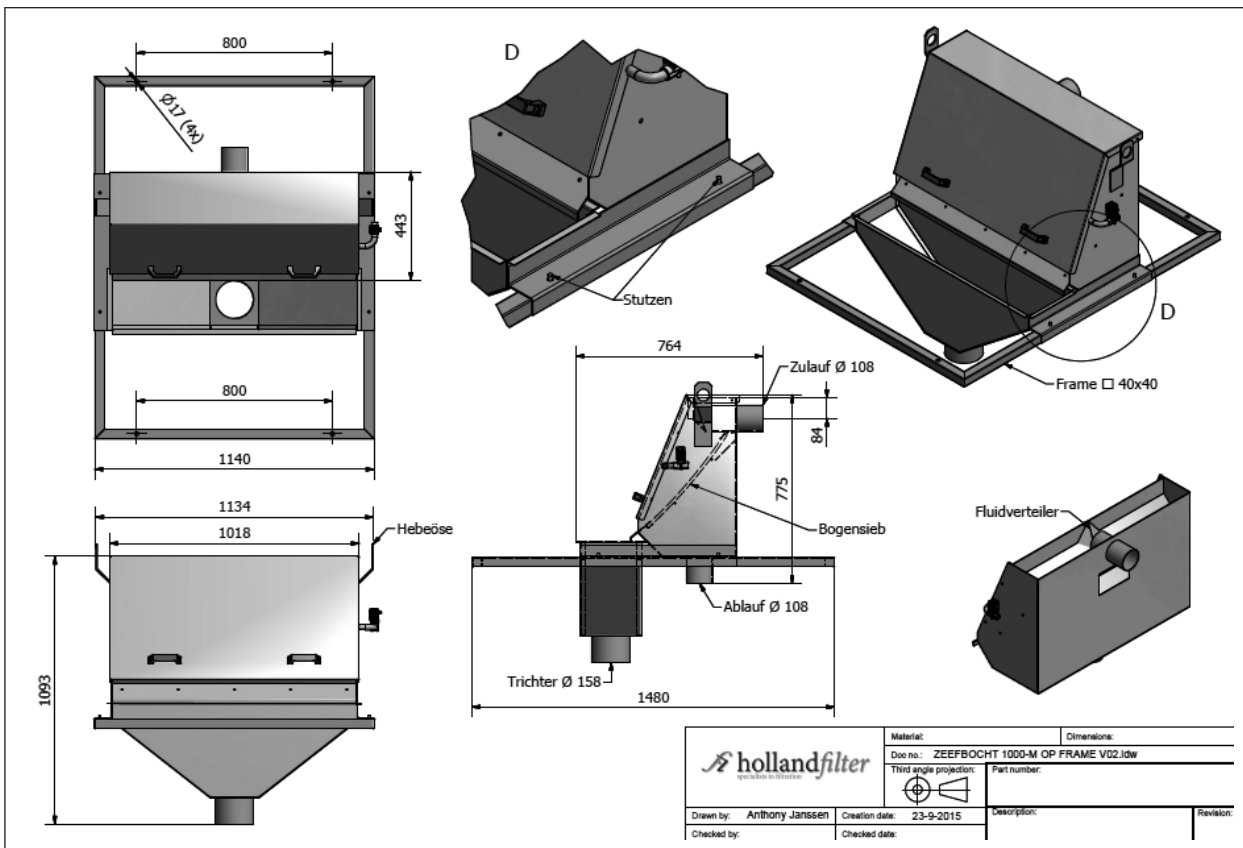
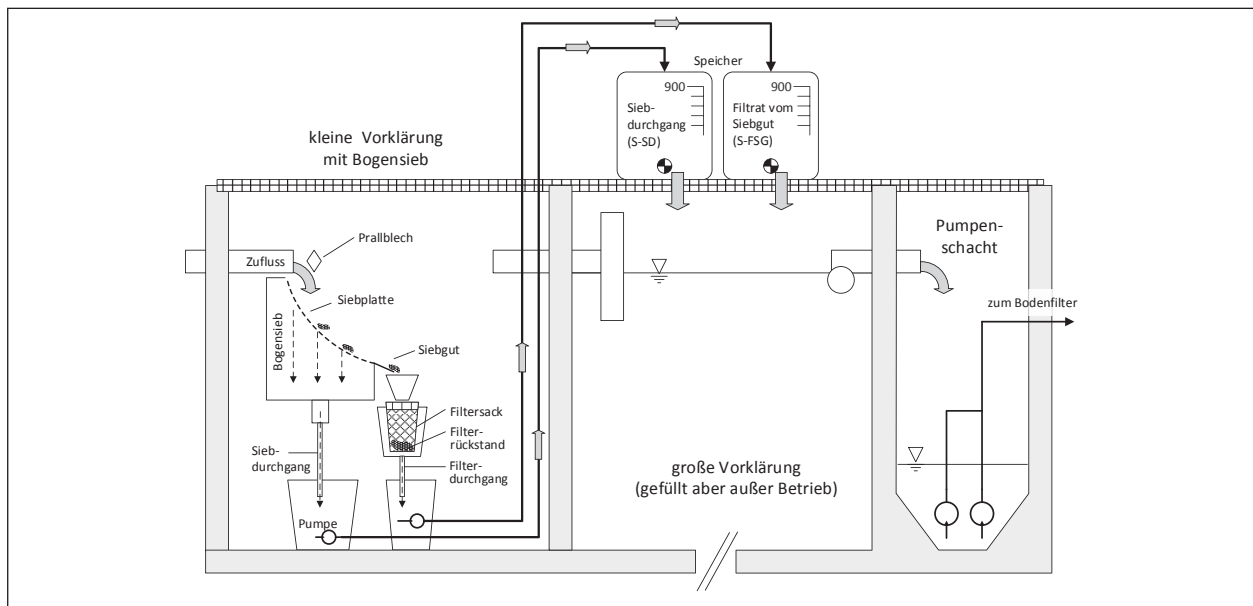


Bild 3-10: Ausführungsplanung des Bogensiebes

nen Siebplatten (1 und 3 mm) getestet, wobei es mehrfach baulich modifiziert werden musste. Hieraus resultieren insgesamt sechs Betriebsphasen des Bogensiebes (Bild 3-11), die in Kapitel 3.3.4 näher beschrieben werden.

Das von der Firma Hollandfilter für den erstmaligen Einsatz an einer PWC-Anlage angefertigten Bogensiebes war durch folgende konstruktiven Merkmale gekennzeichnet (Bild 3-10):

- Spezieller Fluidverteiler in Form eines Prall- und Verteilerbleches im Zulaufbereich (Zulaufrohr DN 100) zur gleichmäßigen Verteilung des Abwassers,
- statische Bedüsung der Siebplatte als automatische Reinigungshilfe bzw. gegen die Gefahr des Trockenfallens,
- zwei austauschbare Siebplatten (1000 x 600 mm) mit der Siebweite 1 mm und 3 mm,



**Bild 3-11:** Probenahmesystem zur Bilanzierung der durch das Bogensieb separierten Stoffströme

- geschlossener Boden mit Ablauf DN 100 zur Erfassung des Siebdurchgangs,
- Abwurftrichter mit Ablauf DN150 zur Erfassung des Siebgutes.

Mit Ausnahme der statischen Bedüsung, die als obligatorisches Zubehör für praktisch alle Bogensiebe erhältlich ist, handelte es sich um Sonderanfertigungen für die spezifische Anwendung. Insbesondere die drei letztgenannten Merkmale waren für die wissenschaftlichen Untersuchungen notwendig, weil sie den Vergleich von zwei Siebweiten (1 und 3 mm) anhand einer Feststoffbilanz ermöglichen.

Das Bogensieb wurde in die erste Kammer (kleine Vorklärung) des Kombibauwerkes eingesetzt (Bild 3-11) und trennte hier das anfallende Abwasser in die Stoffströme Siebdurchgang und Siebgut auf. Der feststoffarme Siebdurchgang (SD) wurde direkt in einen oberirdische Speicherbehälter (IBC 1.000 l) gepumpt und hier gesammelt. Das Siebgut hingegen fiel vom Abwurftrichter zunächst in einen 30 Liter großen Filtersack (Material: PP, Maschenweite 2 mm), wo es nochmals in Filterrückstand und Filterdurchgang separiert wurde. Der feststoffarme Filterdurchgang, d. h. das Filtrat vom Siebgut (FSG), wurde in einen Speicher (ebenfalls IBC 1.000 l) gepumpt; der Filterrückstand vom Siebgut (FRS) verblieb indes im Filtersack.

Die Probenahmen wurden in Abhängigkeit der Speicherfüllstände bzw. des relativen Füllvolumens vom Filtersack durchgeführt. Bedingung für die Probenahme von Siebdurchgang (SD) und Filtrat vom

Siebgut (FSG) war, dass die jeweiligen Speicher mindestens 50 % ihrer Kapazität erreicht bzw. überschritten hatten. Zur Probenahme wurde der Speicherinhalt durch kräftiges Rühren homogenisiert und eine Probe á 1 Liter entnommen. Nach Abschluss der Probenahme wurden die Speicher in die große Vorklärung entleert. Die Probenahmen für den Filterrückstand von Siebgut (FRS) erfolgten immer dann, wenn der Filtersack zu etwa 20–50 % gefüllt war. Praktisch wurde dazu der gefüllte Filtersack gegen einen leeren getauscht. Der gefüllte Filtersack wurde gewogen und somit – nach Abzug des Filtersackleergewichtes die Masse des Filterrückstands ermittelt. Ferner wurde vom Filterrückstand eine Probe von etwa 50 bis 100 g genommen. Abschließend wurde der befüllte Filtersack in die große Vorklärung entleert, d. h. der Filterrückstand zurück ins System gegeben.

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Bogensiebes wurden die Mischproben vom Siebdurchgang (SD) und vom Filtrat des Siebgutes (FSG) analysiert (vgl. Tab. 3-2). Die Aktivität der Wasserstoffionen (pH-Wert) in den Proben wurde mit dem Handmessgerät wtw3430 gemessen. Die Bestimmung der Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen (AFS in mg/l) erfolgte nach DIN 38409-2:1987-03 bzw. DEV H 2 unter Verwendung von jeweils 400–500 ml Probevolumen und Papierfilter der Sorte Whatman 595 (ca. 4–7 µm). In den filtrierten Proben wurden zudem vereinzelt die Konzentrationen an chemischem Sauerstoffbedarf (CSB), Phosphor (PO<sub>4</sub> –P) und Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) photometrisch bestimmt, wobei Geräte der Firma HACH



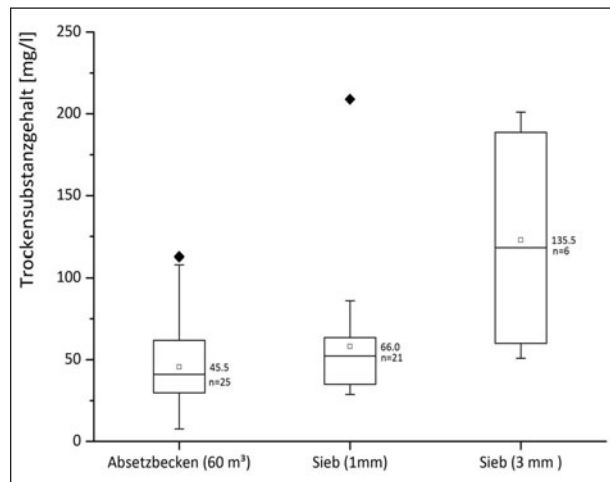
**Bild 3-12:** Blick auf die Speicher zur Bilanzierung und Probenahme von Siebdurchgang und Siebgutfiltrat (linkes Bild) sowie in einen mit Siebgut gefüllten Filtersack (rechtes Bild)

zum Einsatz kamen (Spektralphotometer DR3900 und -Aufschlussblock HT 200s). Für die vom Filterrückstand entnommenen Proben wurde jeweils der Trockenrückstand (TR) bzw. der Wassergehalt (WG) nach DIN 12 880er bestimmt.

Um die Leistungsfähigkeit des Bogensiebes im Vergleich zum konventionellen Absetzbecken beurteilen zu können, wurden zudem Stichproben aus dem Ablauf der großen Vorklärung entnommen und analog zu den Mischproben vom Siebdurchgang des Bogensiebes analysiert (siehe oben). Die Probenahme fand hierbei vorwiegend außerhalb der Messkampagne zur Evaluation des Bogensiebes statt, um mögliche Einflüsse des Versuchsbetriebs auf die Untersuchungsbefunde ausschließen zu können.

### 3.3.3 Leistungsvergleich von Bogensieb und konventioneller Vorklärung

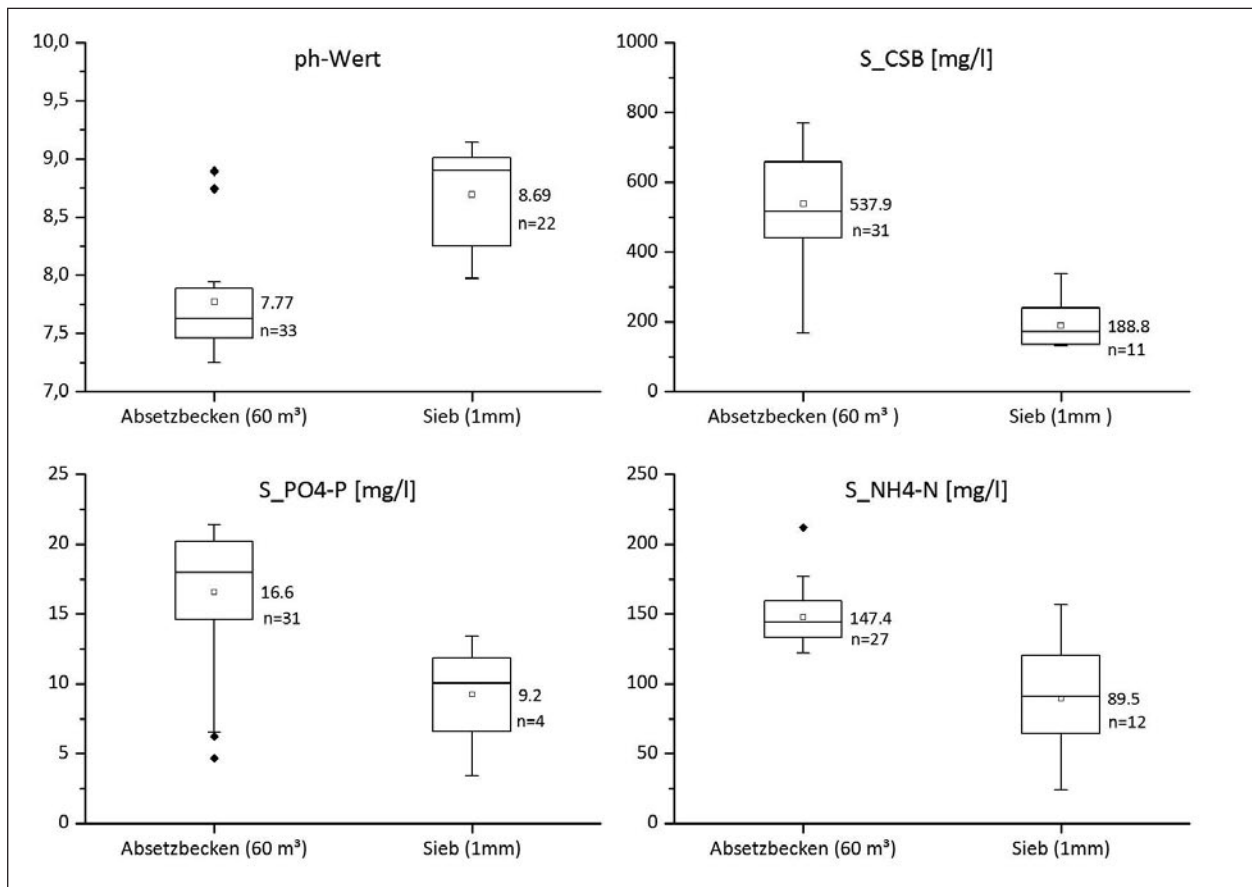
Für den Leistungsvergleich des Bogensiebes mit dem konventionellen Absetzbecken sind in Bild 3-13 und Bild 3-14 die gemessenen Ablaufkonzentrationen in Form von Boxplot-Diagrammen dargestellt. Die Box kennzeichnet hierbei das obere und das untere Quartil (25 % und 75 % Perzentil), d. h. die Höhe der Box entspricht dem Interquartilsabstand (IQR). Der Median ist als Strich eingezeichnet, der Mittelwert zusätzlich als kleines Rechteck. Mittelwert sowie Stichprobenumfang (n) der jeweiligen Datenreihe sind neben der Box numerisch angegeben. Die Antennen (Whisker) sind maximal so lang wie das 1,5-Fache des IQR und enden am Datenwert, der noch innerhalb dieser Grenze liegt. Unterschiedliche Längen der Antennen sind somit



**Bild 3-13:** Feststoffkonzentrationen im Ablauf des Bogensiebes im Vergleich zum Ablauf aus dem großen Absetzbecken (große Vorklärung).

möglich. Werte außerhalb der Grenzen werden als separate Datenpunkte auf den Antennenachsen dargestellt und als Ausreißer interpretiert.

Die Gegenüberstellung in Bild 3-13 bestätigt zunächst die Erwartung, dass der Feststoffrückhalt im Bogensieb von der Siebweite abhängig ist. Es liegen zwar nur wenige Messwerte für den Betrieb des Bogensiebes mit der Siebweite 3 mm vor. Dennoch lässt sich die Aussage treffen, dass mit der Siebweite 1 mm deutlich bessere Abscheideleistungen erzielt worden sind. Im Vergleich zum konventionellen Absetzbecken schneidet das Bogensieb mit der Siebweite 1 mm etwas schlechter ab, doch sind die Unterschiede gering. Hervorzuheben ist das außergewöhnliche große Volumen des Absetzbeckens und die daran gekoppelte sehr lange Aufenthaltszeit von etwa 12 Tagen. Im Normalfall sind die Ab-



**Bild 3-14:** Konzentrationen chemischer Parameter im Ablauf des Bogensiebes mit Siebweite 1 mm im Vergleich zum Ablauf aus dem großen Absetzbecken (große Vorklärung).

setzbecken deutlich kleiner, weswegen dann von höheren Feststoffkonzentrationen im Ablauf auszugehen ist.

Aus Bild 3-14 geht hervor, dass das Bogensieb im Hinblick der chemischen Abwasserparameter Vorteile gegenüber dem Absetzbecken bieten kann. Der pH-Wert im Ablauf des Bogensiebes ist deutlich höher, die Konzentrationen an CSB, PO<sub>4</sub>-P und NH<sub>4</sub>-N hingegen deutlich geringer. Dies hat unmittelbare Auswirkung auf die biologische Abwasserbehandlung, da deutlich geringere Stofffrachten (CSB ~ 35 %, PO<sub>4</sub>-P ~ 55 %, NH<sub>4</sub>-N ~ 60 %) abgebaut werden müssen. Ursächlich dafür ist, dass die partikulären Stoffe (Siebgut) beim Bogensieb sofort und auf Dauer vom restlichen Abwasser (Siedurchgang) getrennt werden, d. h. die Versäuerung und Hydrolyse der Feststoffe im Siebgut wirkt sich nicht auf die Qualität des feststoffarmen Siebdurchgangs aus. Im Absetzbecken finden hingegen Abtrennung und Abbau der Feststoffe simultan statt – und zwar unter anaeroben Bedingungen. Infolge Hydrolyse und Versäuerung des Bodenschlammes kommt es somit zu Rücklösungen von CSB, Phosphor und Stickstoff in die flüssige Phase.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle die Schlussfolgerung gezogen werden, dass das Bogensieb mit einer Siebweite 1 mm eine verfahrenstechnische Alternative zum konventionellen Absetzbecken darstellt. In Bezug auf den Rückhalt von partikulären Stoffen ist es mit dem Absetzbecken als gleichwertig anzusehen. Der wesentliche Vorteil liegt in der Separation des frischen Abwassers in feststoffreiches Siebgut und den feststoffarmen Siebdurchgang, infolgedessen die Stofffrachten im biologisch zu behandelten Abwasser (dem Siebdurchgang) wesentlich reduziert sind. Hieraus ergeben sich ganz neue Perspektiven für die dezentrale Abwasserbehandlung, die auch außerhalb von PWC-Anlagen von Bedeutung sind.

Einerseits können die Anlagen zur biologischen Abwasserbehandlung deutlich kleiner dimensioniert bzw. als Anlagen für den Schwachlastbetrieb mit geringem Technisierungsrad konzipiert werden. Andererseits könnte das abgetrennte Siebgut als mögliches Co-Substrat für die Erzeugung von Biogas dienen, was sich positiv auf die Kosten der Schlammensorgung auswirken würde. Möglicherweise stellt die hohe Stickstofffracht im Siebgut ein Prob-

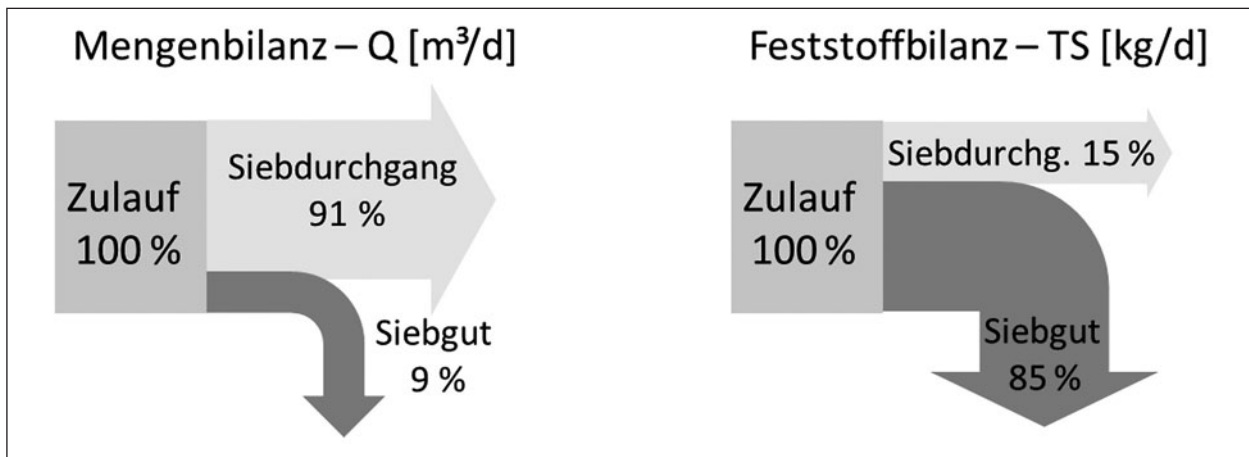


Bild 3-15: Massenbilanzierung für das Bogensieb mit 1 mm Siebweite

lem bei der energetischen Verwertung dar, doch lässt sich dies durch separate Erfassung von Urin umgehen, dem seinerseits ein hohes Potential zur stofflichen Verwertung aufgrund der hohen Konzentration an Stickstoff, Phosphor und Kalium zugesprochen werden kann.

Wie die Ergebnisse der Massenbilanzierung für das Bogensieb zeigen (Bild 3-15), werden mit dem Bogensieb 9 % des anfallenden Abwassers als Siebgut abgetrennt. Bezogen auf den durchschnittlichen Abwasseranfall an der PWC Jalmer Moor ist demnach täglich mit 450 l Siebgut zu rechnen. Wird der Speicher für das Siebgut unter Berücksichtigung des üblichen Transportvolumens von Saugwagen auf 9 m³ ausgelegt, resultiert ein Abfuhrintervall von 20 Tagen bzw. ca. 3 Wochen. Im Siebgut sind 85 % der im Abwasser vorkommenden Feststoffe enthalten, wobei der Feststoffgehalt TR=0,5 % beträgt.

### 3.3.4 Notwendige Modifikationen des Bogensiebes im Versuchsbetrieb

Wie die Bilder 3-16 bis 3-20 dokumentieren, traten im Versuchsbetrieb erhebliche Betriebsprobleme auf und das Bogensieb musste mehrfach baulich modifiziert werden. Um die unmittelbar nach Inbetriebnahme aufgetretenen Verstopfungen zu verhindern (Bild 3-16), wurde zunächst das Prallblech (Fluidverteiler) einseitig versetzt (Bild 3-17).

Für die Phase 3 wurde das Prallblech entnommen und der Zulauf über einen Bogen schräg auf das Sieb geführt (Bild 3-18). Da sich nun Verstopfungen an der Bedüsung bildeten, wurde diese für Phase 4 entfernt. Zudem wurden die in der Siebmitte angeordneten Griffe – wie sie zum Wechsel der Siebplatten dienen sollten – abgetrennt und der Zulaufstut-

zen gekürzt, so dass der Zulauf wieder mittig erfolgen konnte (Bild 3-19).

Schließlich wurde für die Phase 5 das Prallblech wieder angebracht, jedoch im deutlich größeren Abstand zum Zulaufrohr als im Auslieferungszustand (Bild 3-20, links). In dieser Konfiguration konnte das Bogensieb über einen vergleichsweise langen Zeitraum von 45 h betrieben werden, bevor es abermals zu Verstopfungen kam. Für die letzte Phase 6 wurden noch die Siebplatten ausgetauscht, um den Einfluss unterschiedlicher Siebweiten (1 und 3 mm) zu untersuchen. Abgesehen davon wurden aber keine weiteren Modifikationen vorgenommen, d. h. die Zulaufkulisse der Phase 6 war identisch mit der in Phase 5. Aber auch mit der größeren Siebweite (3 mm) war ein verstopfungsfreier Betrieb nicht möglich (Bild 3-20, rechts).

Insgesamt bleibt festzustellen, dass es trotz umfangreicher Umbauten am Bogensieb nicht möglich war, ein Verstopfen der Siebplatte bzw. des Zulaufes zu vermeiden. Ursächlich für die Betriebsstörungen ist der hohe Anteil von Zellulosefasern, die vor allem mit dem Toilettenpapier in das Schmutzwasser gelangen. Aus betrieblicher Sicht stellt somit das Bogensieb keine geeignete Alternative zu einem konventionellen Absetzbecken dar - zumindest nicht in der getesteten Version. Mit einer speziell an die Belange von PWC-Anlagen angepassten Konstruktion (geringere Breite, längeres Sieb, evtl. Mazeration des Zulaufs) ließen sich die dokumentierten Betriebsprobleme aber möglicherweise umgehen. Insbesondere angesichts der im Abschnitt aufgezeigten Leistungspotentiale und der sich hieraus ergebenden Vielfalt möglicher Verfahrenskonzepte wird die technisch-konstruktive Optimierung eines Bogensiebes für sinnvoll gehalten.

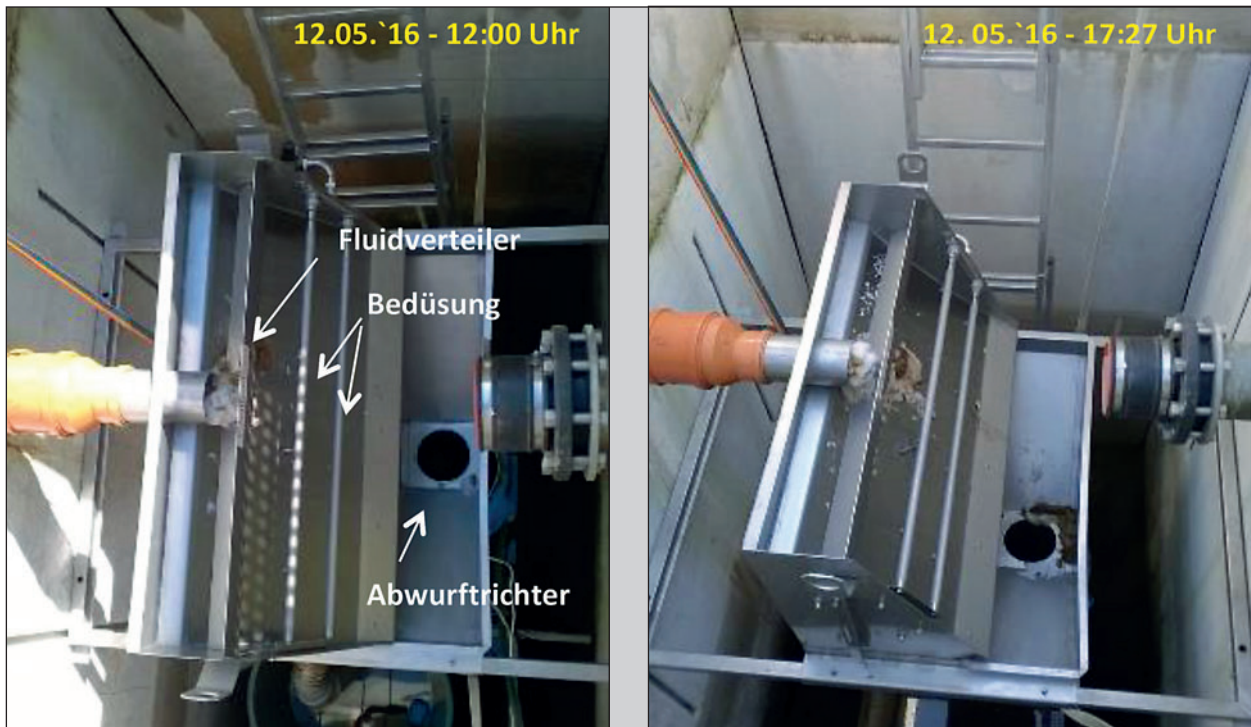


Bild 3-16: Konfiguration des Bogensiebs in Phase 1 (Inbetriebnahme)

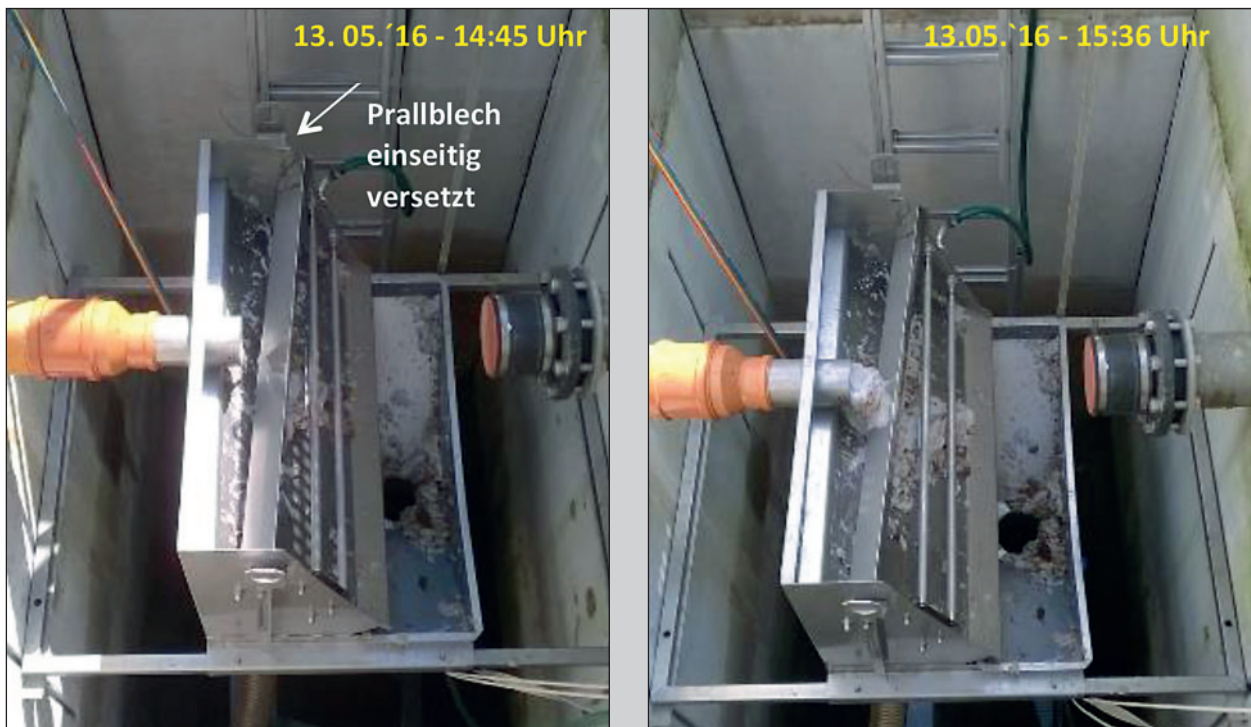


Bild 3-19: Modifikation in Phase 2- einseitig versetztes Prallblech

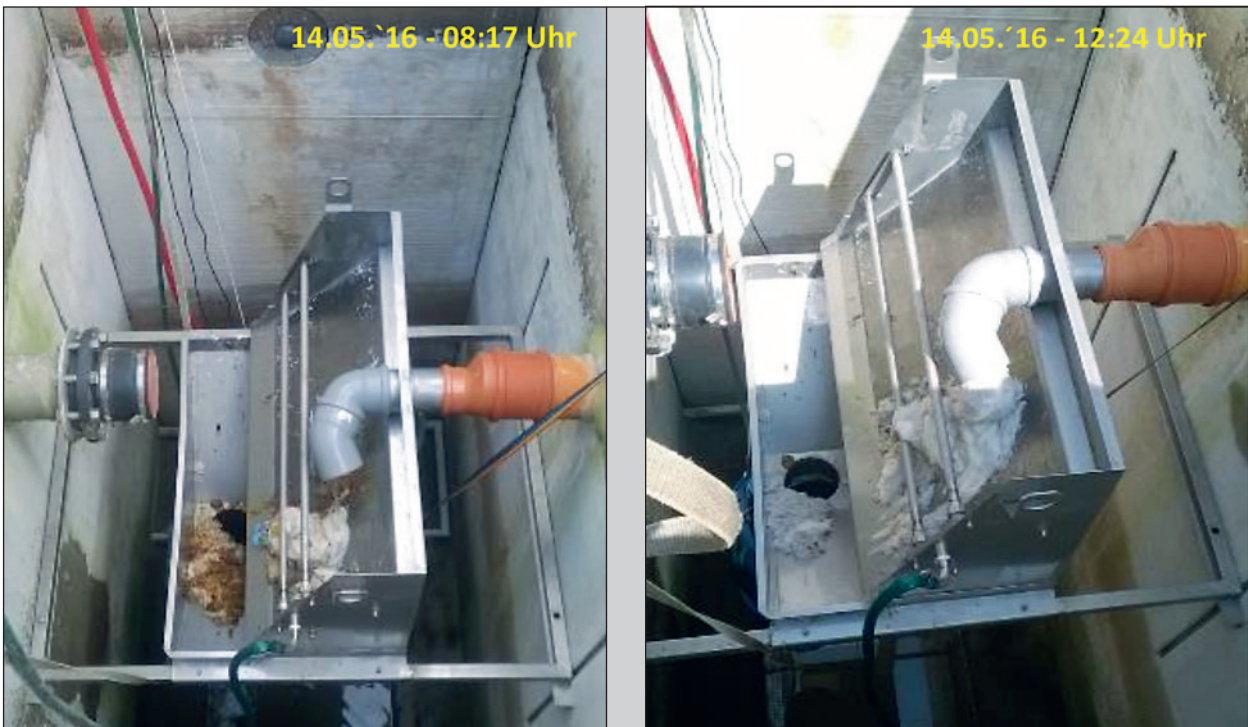
### 3.4 Auswirkungen der Urinseparation auf die Abwasserbehandlung

#### 3.4.1 Hintergrund und Ziele der Urinseparation

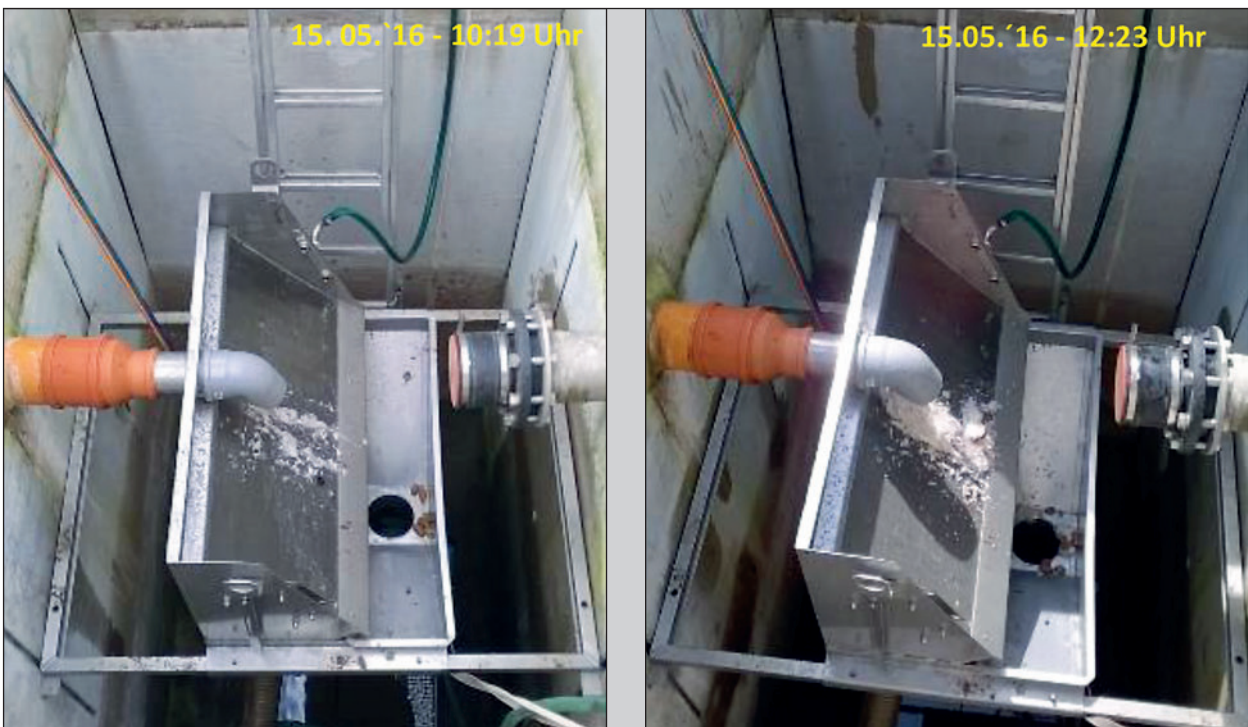
Aufgrund des kurzzeitigen Aufenthalts der Besucher und dem eingeschränkten Serviceangebot

(nur Toiletten) ist das an PWC-Anlage anfallende Abwasser durch einen hohen Anteil von Urin im Abwassergemisch gekennzeichnet. Tatsächlich stammen die Stofffrachten im Abwasser von PWC-Anlagen überwiegend aus dem Urin. Folglich kann durch die separate Sammlung von männlichem Urin – wie sie vergleichsweise einfach mit





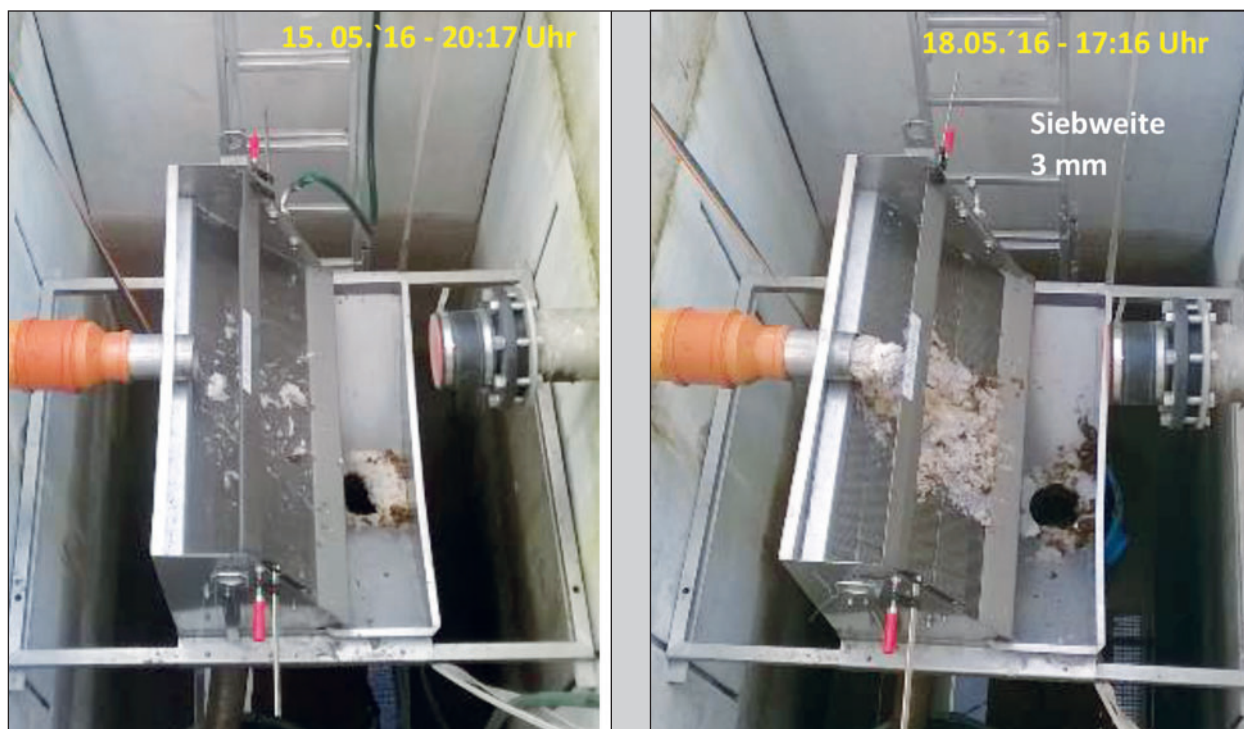
**Bild 3-18:** Modifikation in Phase 3 – Prallblech entfernt, seitlicher Zulauf über Rohrbogen



**Bild 3-19:** Modifikation in Phase 4 – Bedüsung und Handgriffe entfernt sowie Zulaufstutzen gekürzt, Zulauf erfolgt nun wieder mittig über an der Sohle dekupierten Bogen

wasserlosen Urinalen zu bewerkstelligen ist- die Stofffracht im Abwasser reduziert werden, insbesondere im Hinblick der Stickstofffrachten. Diese sind bei der biologischen Abwasserbehandlung mit konventionellen Verfahren problematisch, da die im aeroben Milieu unweigerlich einsetzende Nitrifikati-

on zur Versäuerung führen und somit alle anderen Ab- und Umbauprozesse beeinträchtigen kann. Im Umkehrschluss kann die Urinseparation zur Stabilisierung des Reinigungsprozesses beitragen. Ziel der Untersuchungen war es, den theoretisch zu erwartenden positiven Effekt der Urinseparation auf



**Bild 3-20:** Konfiguration in Phase 4 (links) und 5 (rechts) – Prallblech in größerer Entfernung zum Zulaufstutzen als im Auslieferungszustand

die Abwasserbehandlung in der Praxis nachzuweisen. Primär sollte gezeigt werden, inwieweit sich die Urinseparation positiv auf die biologische Abwasserbehandlung auswirkt. Sekundär war von Interesse, ob die Urinseparation auch Einfluss auf die im Vorklärbecken ablaufenden anaeroben Abbauprozesse nimmt.

### 3.4.2 Durchführung der Messkampagnen

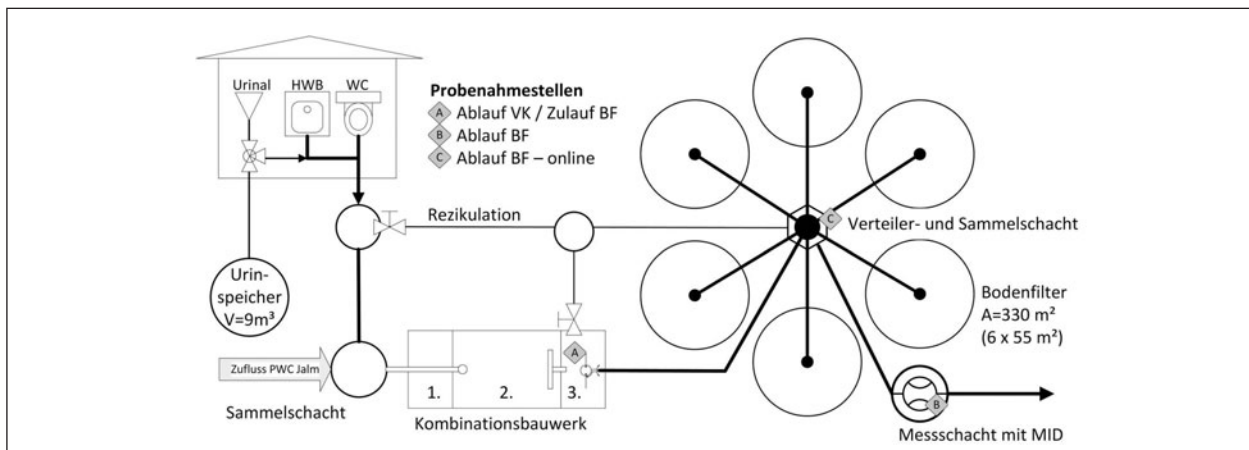
Zur Evaluation der Urinabtrennung wurden zwei Messkampagnen von jeweils einer Woche im Abstand von einem Monat durchgeführt:

1. Messkampagne Regelbetrieb: 11.-18.05.2016
2. Messkampagne Urinseparation: 15.- 22.06.2016

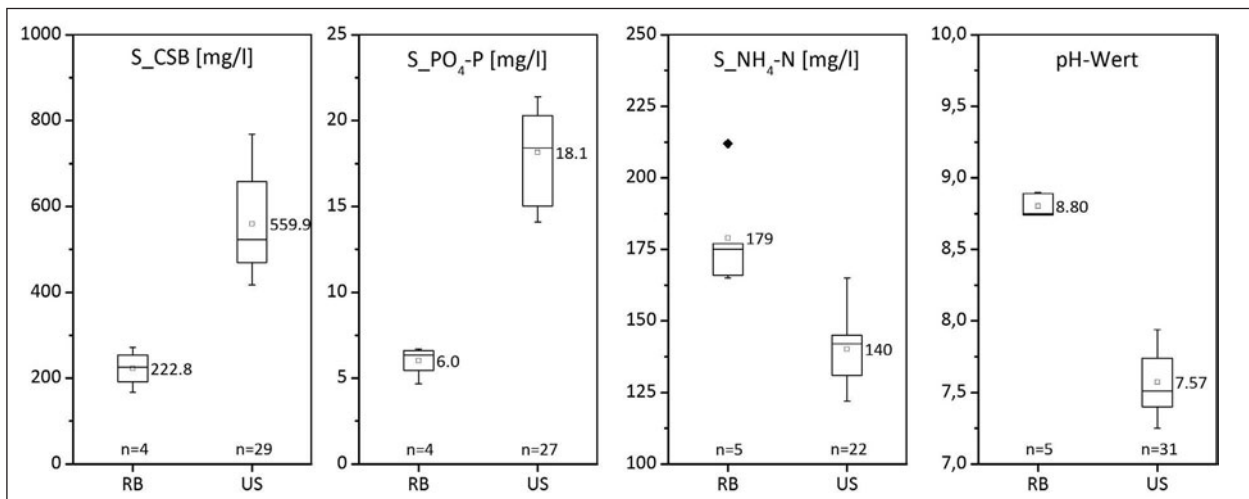
Die Urinabtrennung selbst wurde am 14.05.2016 auf der PWC-Anlage in Betrieb genommen, d. h. innerhalb der Messkampagne zum Regelbetrieb. Aufgrund der sehr großen Vorklärung bzw. Fließzeiten ( $V = 60 \text{ m}^3$  bzw.  $t_f = \geq 12 \text{ d}$ ) war aber davon auszugehen, dass die Verhältnisse im Ablauf der Vorklärung dem Regelbetrieb entsprechen. In beiden Messkampagnen wurden Stichproben vom Ablauf der Vorklärung und im größeren Umfang Stichproben vom Ablauf der Bodenfilter gezogen und analysiert (Bild 3-21).

Die Probenahme erfolgte 3 bis 4mal täglich (9:00/12:00/15:00 und 17:00 Uhr) vorzugsweise im Messschacht, weil sich hier die Probenahmestelle für die behördliche Überwachung der Ablaufgrenzwerte befindet. Zudem wurden einige Probe aus dem vorgelagerten Verteiler- und Sammelschacht entnommen, um Rückschlüsse auf die Repräsentativität der an dieser Stelle mittels Onlinemesssonden erfassten Daten ziehen bzw. die bis zum Messschacht stattfindenden Veränderungen beurteilen zu können. Insgesamt sollte mit der Beprobung des Anlagenablaufs die Ablaufqualität des Bodenfilters beurteilt und zugleich die erhobenen Onlinemesswerte verifiziert bzw. um fehlende Parameter ergänzt werden.

Die Analytik der gezogenen Proben erfolgte analog zum Vorgehen bei der Messkampagne zur Evaluation des Bogensiebes, d. h. von allen Proben wurden zunächst der pH-Wert und nach Filtration der Proben die Konzentrationen an CSB,  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{PO}_4\text{-P}$  photometrisch bestimmt. Für die Stichproben vom Anlagenablauf wurden zusätzlich die Parameter Gesamtstickstoff ( $\text{TN}_b$ ), Nitritstickstoff ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) und Nitratstickstoff ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) bestimmt, um Aussagen zur Nitrifikationskapazität treffen zu können. Für die Stichproben vom Ablauf der großen Vorklärung erfolgte außerdem die Bestimmung der Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen (AFS in mg/l).



**Bild 3-21:** Probenahmestellen bei der Messkampagne zur Evaluation der Urinseparation



**Bild 3-22:** Gegenüberstellung der Konzentrationen vom Ablauf der großen Vorklärung im Regelbetrieb (RB) und bei Urinseparation (US)

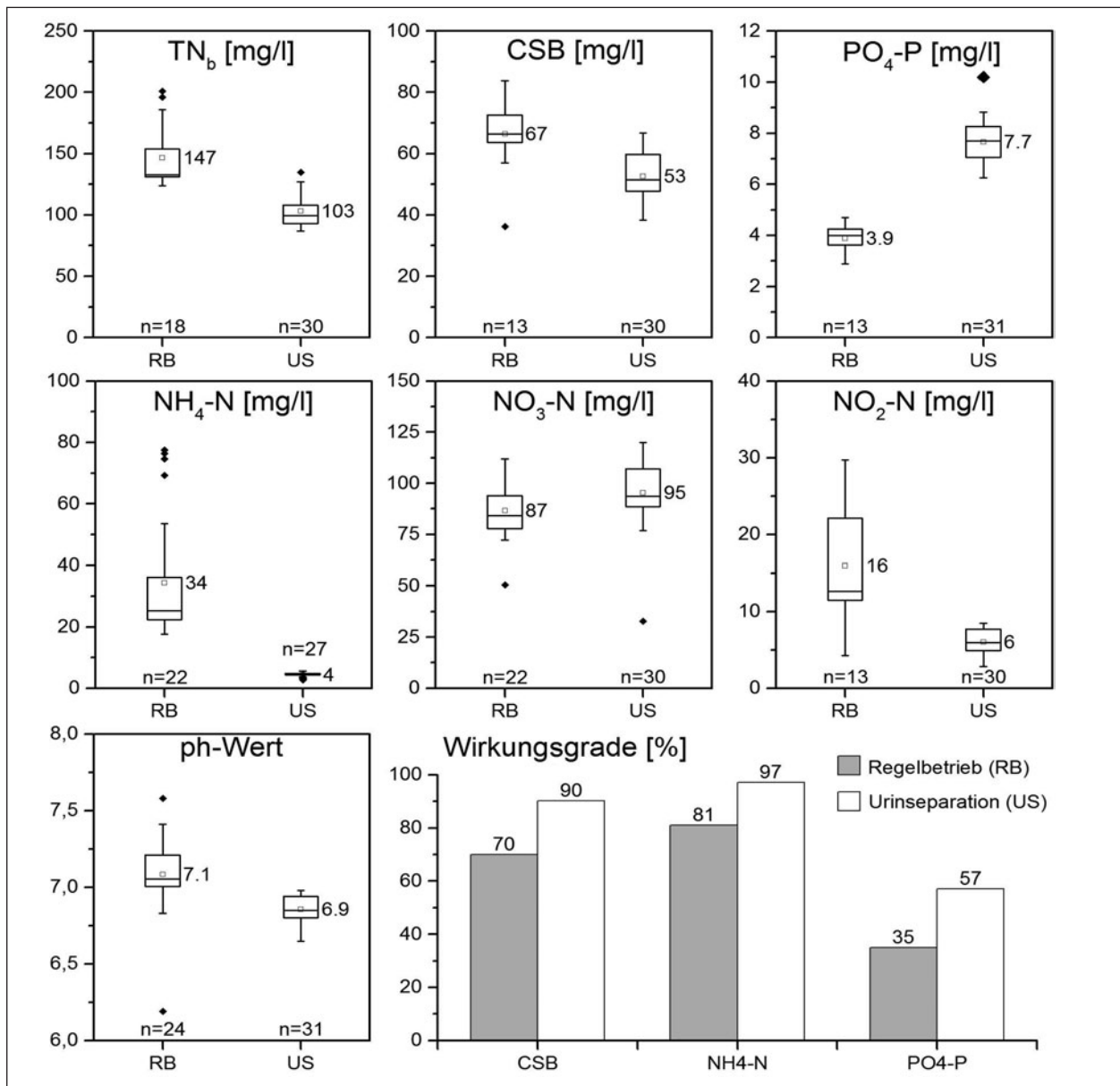
Die somit erhaltenen Messwerte zur Feststoffkonzentration kamen für den Leistungsvergleich der großen Vorklärung mit dem Bogensieb in Ansatz (vgl. Kapitel 3.3.3).

### 3.4.3 Auswirkungen auf den anaeroben Abbau von Feststoffen im Vorklärbecken

In Bild 3-23 sind die gemessenen Konzentrationen im Ablauf der großen Vorklärung in Form von Boxplots dargestellt, wobei zwischen Regelbetrieb (RB) und Urinseparation (US) differenziert wird. Zwar ist der Stichprobenumfang für den Regelbetrieb deutlich geringer als beim Betrieb mit Urinseparation. Dennoch können Aussagen zum Einfluss der Urinseparation auf die Ablaufqualität der großen Vorklärung getroffen werden.

Offensichtlich führt die Urinseparation zu einem Anstieg der Konzentrationen an CSB und Phosphor im

Ablauf der Vorklärung, während der Gehalt an Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) und die Aktivität der Wasserstoffionen (pH-Wert) abnehmen. Die Ursache für dieses Phänomen ist in der Wechselwirkung der Urinseparation mit dem anaeroben Abbau der in der Vorklärung zurückgehaltenen Feststoffe zu suchen. Infolge der separaten Sammlung des männlichen Urins findet zunächst eine sofortige Reduktion der Harnstofffrachten statt. Weil nun weniger Harnstoff hydrolysiert wird ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{NH}_3$ ) nehmen auch die Konzentration an Ammoniak (NH<sub>3</sub>) bzw. dissoziiertem Ammonium ab und es werden weniger Hydroxidionen freigesetzt ( $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ ). Dieser Effekt lässt sich unmittelbar am Rückgang der Konzentration von Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) aber auch vom pH-Wert im Ablauf der Vorklärung erkennen. Weil sich zudem das NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Gleichgewicht mit sinkendem pH-Wert auf die Seite des NH<sub>4</sub><sup>+</sup> verschiebt ( $\text{pK}_s = 9,25$ ), nimmt die Konzentration des prinzipiell toxisch auf die Biozö-



**Bild 3-23:** Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgrade der Bodenfilter im Regelbetrieb (RB) und bei Urinseparation (US)

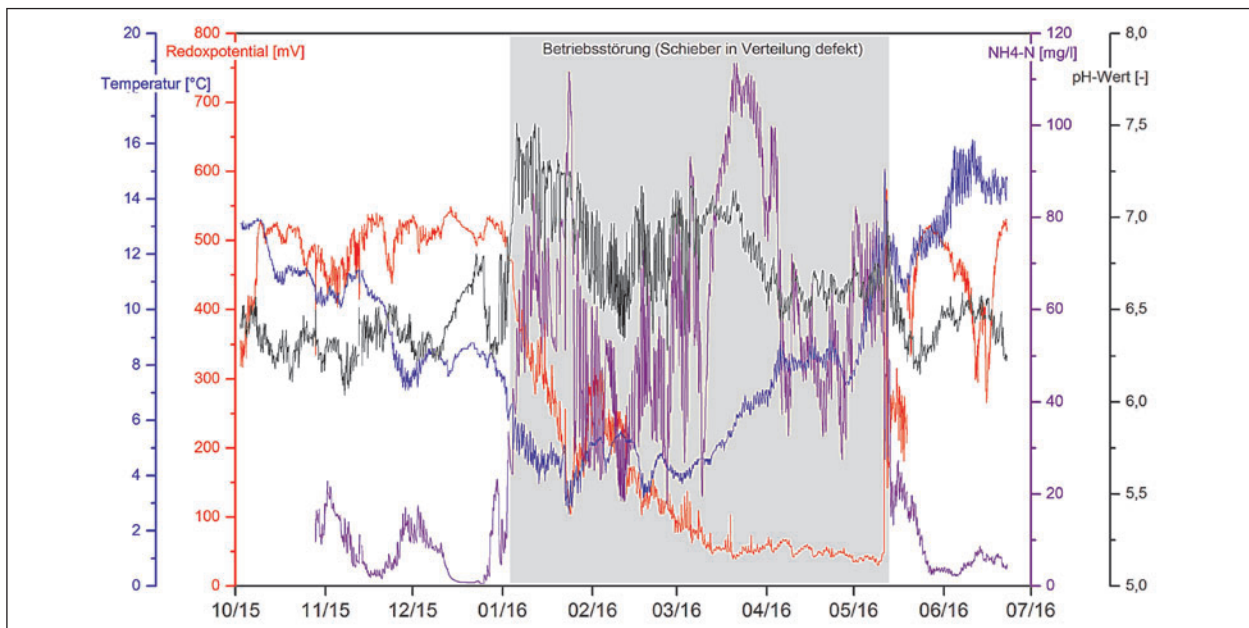
nose wirkenden Ammoniaks (NH<sub>3</sub>) merklich ab. Letztlich führen geringe Ammoniakkonzentrationen und pH-Werte im neutralen Bereich dazu, dass der anaerobe Abbau von Feststoffen bei der Urinseparation weniger gehemmt wird. Infolgedessen nimmt auch die Rücklösung von CSB und Phosphor gegenüber dem Regelbetrieb zu, was erhöhte Konzentrationen dieser Parameter im Ablauf der Vorklärung nach sich zieht.

#### 3.4.4 Auswirkungen auf die biologische Abwasserbehandlung

In Bild 3-23 sind die Konzentrationen einzelner Parameter im Ablauf des Bogenfilters bei Regelbetrieb

(RB) und Urinseparation (US) gegenübergestellt. Zudem sind mit Bezug auf die jeweiligen Zulaufkonzentrationen die Abbauleistungen angegeben.

Anhand der Datenreihen für Gesamtstickstoff (TN<sub>b</sub>-N) kann zunächst abgelesen werden, dass mit der Urinseparation die Emissionen der Kläranlage in Bezug auf Stickstoff deutlich reduziert werden: Gegenüber dem Regelbetrieb sind die Konzentrationen an Gesamtstickstoff um etwa 30 % geringer, was in der Größenordnung der durch Urinseparation abgetrennten Stickstofffrachten entspricht (22 % Reduktion von NH<sub>4</sub>-N im Zulauf, vgl. Bild 3-22). Die unterschiedlichen Stickstofffraktionen betrachtend fällt zudem die wesentlich verbesserte Nitrifikationskapazität des Bodenfilters bei Urinseparation auf.



**Bild 3-24:** Verlauf von Temperatur, Redoxpotential, NH<sub>4</sub>-N und pH-Wert im Ablauf des Bodenfilters über den gesamten Versuchszeitraum

Im Ablauf sind bei gleichbleibend hohen Nitratkonzentrationen (NO<sub>3</sub>-N) nur noch geringe Konzentrationen an Ammonium (NH<sub>4</sub>-N) und Nitrit (NO<sub>2</sub>-N) vorhanden. Der positive Effekt der Urinseparation auf die Ablaufqualität des Bodenfilters für NH<sub>4</sub>-N lässt sich auch an den Online-Messdaten erkennen, wie sie in Bild 3-28 gezeigt werden. Bezogen auf den Gehalt an Ammoniumstickstoff steigt der Wirkungsgrad der Anlage von vormals 81 bei Regelbetrieb auf 97 % an.

Auch für CSB und Phosphor ist eine deutliche Steigerung der Abbauleistung bei Urinseparation zu verzeichnen. Im Fall von CSB kompensiert der sehr hohe Wirkungsgrad bei Urinseparation von 90 % letztlich die höhere Belastung, wie sie durch Rücklöseprozesse in der Vorklärung zu Stande kam. Infolgedessen sind die CSB-Konzentration im Ablauf des Bodenfilters bei Urinseparation geringer als im Regelbetrieb. Bezüglich Phosphor sind die Ablaufkonzentrationen indes höher als im Regelbetrieb, d. h. die zusätzlichen Frachten aus der Vorklärung finden sich anteilig im Ablauf des Bodenfilters wieder. Verantwortlich dafür ist aber die Adsorptionskapazität des Bodenfilters, die generell begrenzt ist und mit fortschreitender Betriebsdauer immer weiter nachlässt. Demnach könnten sich die festgestellten Konzentrationsunterschiede über längere Betrachtungsräume auch egalisieren.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass die Urinseparation einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Betriebssicherheit der biologischen Reinigungsstufe

beitragen kann, wobei die Wechselwirkungen mit dem vorgelagerten Verfahren zur mechanischen Vorbehandlung des Abwassers zu beachten sind. Grundsätzlich stellt die Urinseparation eine vergleichsweise preiswerte Lösung zur Kompensation von Belastungsspitzen im Zulauf der Kläranlage dar und ist deshalb für PWC-Anlagen mit dezentraler Abwasserbehandlung zu empfehlen. Insbesondere für Anlagen mit Bodenfilter als biologischer Stufe bietet sich die Urinseparation als wirksame Maßnahme zur Stabilisierung der Reinigungsleistung an.

### 3.5 Fernüberwachung und Dokumentation des Anlagenbetriebs

Zur Überwachung und Dokumentation des Anlagenbetriebes waren im ursprünglichen Untersuchungskonzept verschiedenen Messstellen vorgesehen, die jedoch nur teilweise realisiert werden konnten. Dennoch lassen sich anhand der aufgenommenen Online-Messdaten sowie den dokumentierten Zähler- und Füllständen relevante Aussagen zum Betrieb der PWC-Anlage Jalmer Moor treffen.

#### 3.5.1 Überwachung der Ablaufqualität des Bodenfilters

Im Verteiler- und Sammelschacht (Ablauf-VSS) waren Onlinemesssonden für Temperatur, Redoxpotential, pH-Wert, Trübung, Sauerstoffgehalt und Gehalt an Ammoniumstickstoff (NH<sub>4</sub>-N) installiert, die



**Bild 3-25:** Kolmationserscheinungen durch Überlastung des Bodenfilters infolge fehlerhafter Verteilung (Schieber in Verteilerschacht defekt)

eine kontinuierliche (Fern-)überwachung des Anlagenablaufs ermöglichten (vgl. Bild 2-10). Anhand der hier aufgezeichneten Daten konnten zum einen Betriebsprobleme identifiziert und die Auswirkungen der Urinseparation auf den Reinigungsprozess nachvollzogen werden. Bild 3-24 zeigte die Entwicklung von Temperatur, Redoxpotential,  $\text{NH}_4$ -N und pH-Wert im Ablauf des Bodenfilters über den gesamten Versuchszeitraum.

Grau hinterlegt ist der Zeitraum für eine Betriebsstörung, die sich Anfang Januar 2016 ereignete und erst Mitte Mai 2016 behoben wurde. Ursache war ein defekter Schieber im Verteilerschacht, infolgedessen anstatt der Filtersegmente 1 bis 3 immer das Filtersegment 4 beschickt wurde (Schieber war stromlos geöffnet). Die hierdurch einsetzende Überlastung des Bodenfilters ist am Anstieg von  $\text{NH}_4$ -N und pH-Wert bzw. dem Abfall des Redoxpotentials zu erkennen. Tatsächlich kam es am Filtersegment 4 zu Kolmationserscheinungen (Bild 3-25). Die im Winterbetrieb bei niedrigen Abwassertemperaturen durchaus zu erwartenden höheren  $\text{NH}_4$ -N-Ablaufwerte verbesserten sich deshalb auch bei steigenden Temperaturen nicht.

Bild 3-26 zeigt die Entwicklung aller online gemessener Parameter im Ablauf des Bodenfilters nach Behebung der Funktionsstörung am 11.05.2016 bis zum Versuchsende. Die Auswirkung der Urinseparation (ab 15.05.2016) ist gut am Verlauf der  $\text{NH}_4$ -N Konzentration (Magenta) zu erkennen: Innerhalb von etwa 12 Tagen gehen die  $\text{NH}_4$ -N Konzentration im Ablauf von 20 mg/l auf unter 10 mg/l zurück. Die Zeitspanne entspricht der hydraulischen Aufenthaltszeit des Abwassers in der Vorklärung, d. h. die sukzessive Entlastung des Bodenfilters wird anhand der  $\text{NH}_4$ -N Konzentration im Ablauf sichtbar. Auch die ansteigende Kurve für das Redoxpotential

(rote Linie) gibt einen Hinweis darauf, dass die Oxidationskapazität des Bodenfilters durch die verringerte Stickstoffbelastung verbessert wurde.

Die Sprünge am 19.05.2016 und 15.06.2016 in den Ganglinien für Redoxpotential (rot), Trübung (olivgrün) und Sauerstoff (orange) offenbarten die Abhängigkeit der Messgenauigkeit von der regelmäßigen Reinigung der Messsonden. So fallen zwar die Sauerstoffkonzentration bis zum 15.06.2016 kontinuierlich ab, doch lagen angesichts der gleichbleibend geringen Konzentrationen an Ammoniumstickstoff im Ablauf sowie dem sprunghaften Anstieg der Sauerstoffkonzentration nach Reinigung der Messsonde am 15.06.2015 sehr wahrscheinlich keine Sauerstofflimitierung im Bodenfilter vor.

Für die mögliche Anwendung von Online-Messtechnik auf PWC-Anlagen zur Fernüberwachung der Ablaufqualität leitet sich hieraus zum einen die allgemeine Forderung nach einer regelmäßigen Reinigung der Messsonden ab, die mindestens einmal pro Woche erfolgen sollte. Zum anderen kann der Einsatz von  $\text{NH}_4$ -N Messsonden zur Fernüberwachung empfohlen werden, weil diese vergleichsweise unempfindlich gegenüber Verunreinigungen ist und zugleich aussagekräftige Messwerte liefert. Zudem stimmen die online gemessenen und analytisch bestimmten  $\text{NH}_4$ -N Konzentration (kleine Rechtecke in Bild 3-26) gut überein, so dass die  $\text{NH}_4$ -N Messsonde als verlässlich eingestuft werden kann.

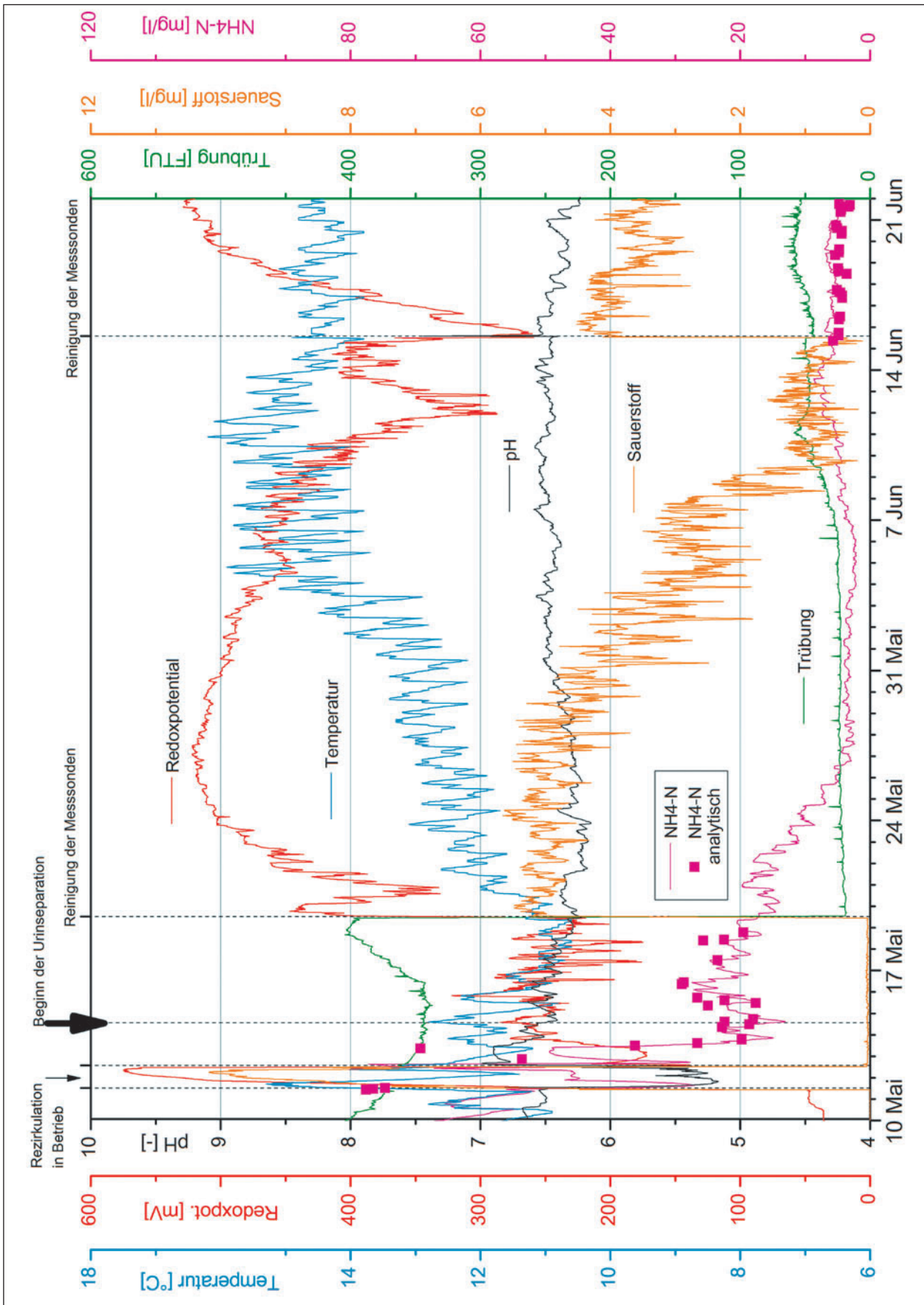
### 3.5.2 Wasserverbrauch –und Abwasseranfall

Die kontinuierliche Erfassung von Wasserverbrauch und Abwasseranfall scheiterte zwar aufgrund technischer Unzulänglichkeiten, doch können anhand der händisch dokumentierten Zählerwerte und Füllstände entsprechende Aussagen getroffen werden.

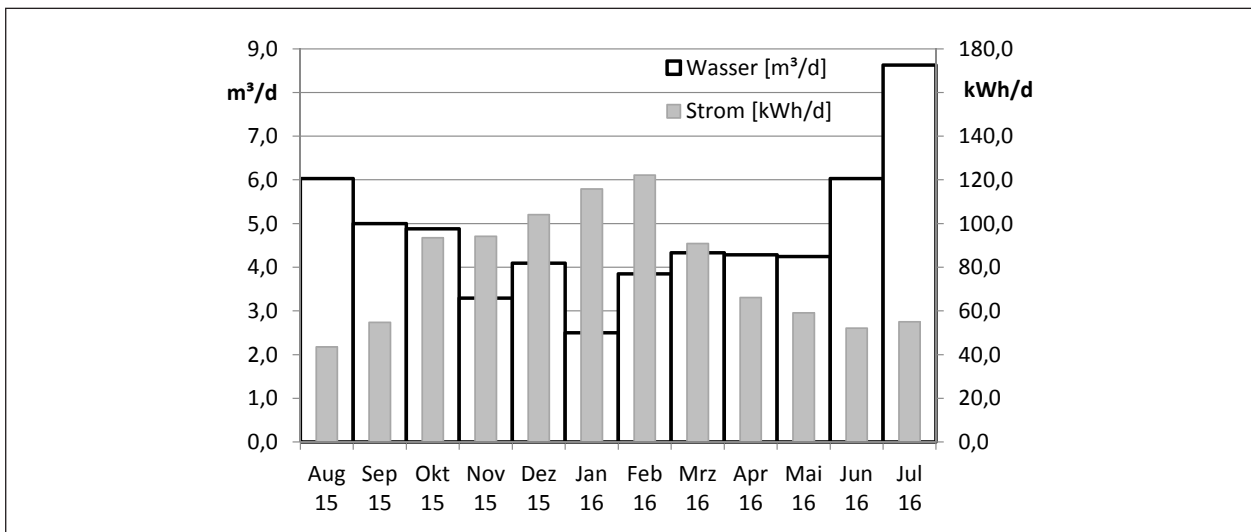
#### Wasserverbrauch und Strombedarf

Anhand der täglich von der Reinigungsfirma abgelesenen Wasser- und Stromzählerstände wurden die Mittelwerte des täglichen Wasser- und Strombedarf für jeden Monat berechnet. Bild 3-27 zeigt die resultierenden Schwankungen im Jahresverlauf.

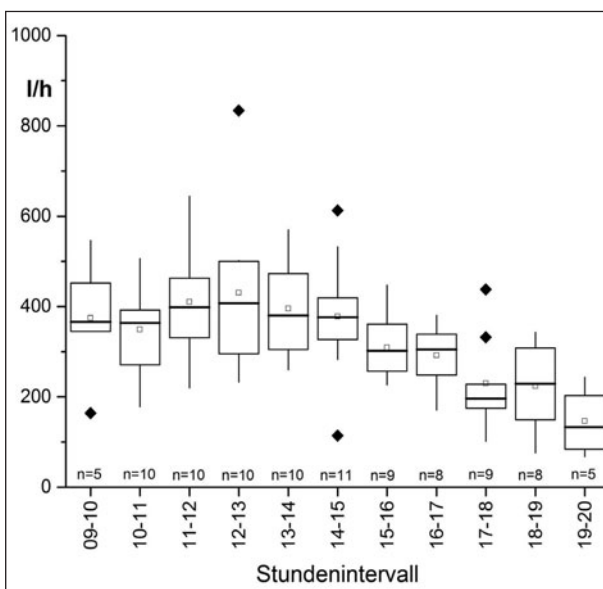
Erwartungsgemäß ist der Strombedarf der PWC-Anlage im Sommer geringer als in den Wintermonaten (Heizung, Beleuchtung); im Mittel beträgt er 80 kWh/d. Der Wasserverbrauch ist hingegen von der Auslastung der PWC-Anlage abhängig, die ihrerseits an das Verkehrsaufkommen auf der Autobahn



**Bild 3-26:** Online gemessene Daten (Linien) und Analyseergebnisse für Ammonium-Stickstoff (Quadrate) im Ablauf des Bodenfilters nach Inbetriebnahme der Urinseparation



**Bild 3-27** Täglicher Wasser- und Stromverbrauch auf der PWC Jalmer Moor



**Bild 3-28:** Schwankungen des Wasserverbrauchs im Tagesverlauf (für 11 Tage ermittelt)

gekoppelt ist. Vereinfacht kann gesagt werden, dass umso mehr Wasser verbraucht wird, je mehr Kfz auf der Autobahn sind. Insofern ist der Jahresverlauf des Wasserverbrauchs ein Spiegelbild des Verkehrsaufkommens auf der Autobahn. Spitzen treten während der Hauptreisezeiten zwischen Juni und August auf ( $Q_{BW} = 6,0 \text{ m}^3/\text{d}$ ), im Winter um die Jahreswende ist der Verbrauch am geringsten ( $Q_{BW} = 2,5 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

Die vergleichsweise sehr hohen Werte des Wasserverbrauchs im Juli 2016 ( $Q_{BW} = 8,6 \text{ m}^3/\text{d}$ ) sind auf betriebliche Einstellungen zurückzuführen. Nach Abschluss der Untersuchungen des F&E Vorhabens auf der PWC Jalmer Moor wurde Ende Juni

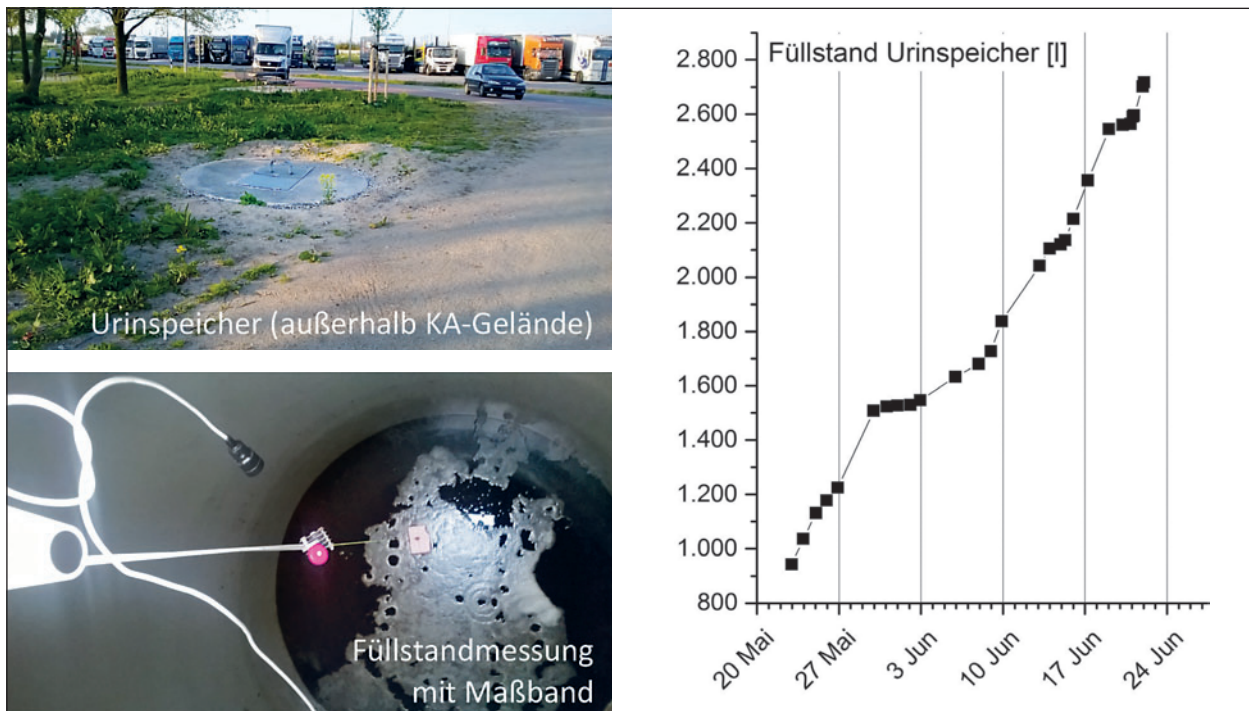
die Spülung der bis dahin wasserlosen Urinale in Betrieb genommen.

Bezüglich der Spitzenwerte im Tagesverlauf kann auf die Zählerstände zurückgegriffen werden, wie sie im Rahmen der stündlichen Kontrollgänge bei den Messkampagnen im Mai und Juni 2016 jeweils von 09:00 bis 20:00 Uhr protokolliert wurden. Wie Bild 3-28 zu entnehmen ist, erreichte der Wasserverbrauch gegen Mittag mit durchschnittlich 400 l/h ein Maximum und ging gegen Abend auf unter 200 l/h zurück. Eine zweite Spitze trat zwischen 09:00 und 10:00 Uhr auf, weil in diesem Zeitraum die Reinigung der Sanitäranlagen stattfindet. Hierfür werden jeweils etwa 120 l verbraucht.

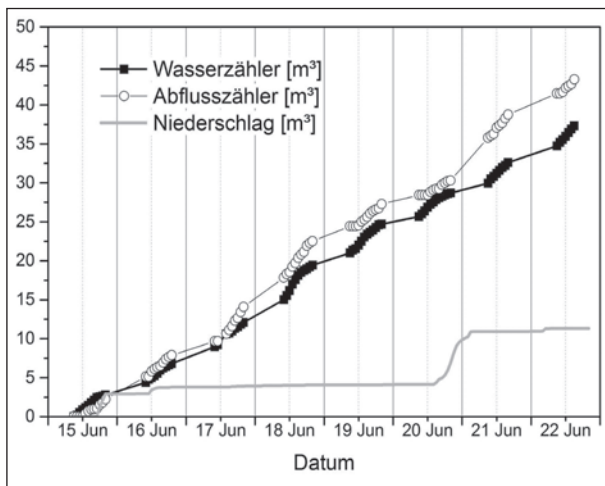
Neben dem Wasserzähler wurde im Rahmen der Messkampagnen auch der Durchflussmesser im Anlagenablauf (MID) stündlich abgelesen. Permanent wurde zudem der Niederschlag auf der PWC Jalmer Moor registriert. Für den Zeitraum der Messkampagnen ist somit die Wasserbilanz der Kläranlage möglich ( $Q_{zu} = \text{Wasserverbrauch} + \text{Niederschlag} = Q_{ab}$ ). Als Beispiel sind in Bild 3-30 für die Messkampagne vom 15. bis 22. Juni 2016 die Summenlinien der registrierten Wasser- und Abwasserzählerstände sowie die für eine Fläche von  $A = 357 \text{ m}^2$  (Bodenfilter + Kombinationsbauwerk) berechneten Niederschlagsmengen aufgezeigt.

Die kumulierten Werte betrachtend kann festgestellt werden, dass im betrachteten Zeitraum  $37 \text{ m}^3$  Wasser verbraucht und zusätzlich  $11 \text{ m}^3$  Niederschlagswasser in das System eingetragen wurden. Somit betrug der Zufluss mindestens  $48 \text{ m}^3$ , doch wurden nur  $43 \text{ m}^3$  im Ablauf der Anlage gemessen. Die Dif-





**Bild 3-29:** Bestimmung des Urinanfalls mit improvisierter Füllstandmessung im Speicher



**Bild 3-30:** Summenlinien für Wasserverbrauch, Niederschlag und Abwasseranfall im Zeitraum vom 15. bis 22. Juni 2016 als Grundlage für die Massenbilanz der PWC-Anlage Jalmer Moor

ferenz von 5 m<sup>3</sup> (bzw. etwa 10 %) ist sehr wahrscheinlich auf Evapotranspirationen zurückzuführen, die sowohl im Bodenfilter als auch im Kombinationsbauwerk (offene Bauweise) auftreten können.

### Urinanfall

Ab dem 14.5.2016 wurde die Urinabtrennung in den Herrenpissoirs in Betrieb genommen. Der Urin wurde in den Urinsammelbehälter geleitet und dort gespeichert. Die Entwicklung des Füllungsgrades wurde händisch gemessen, hieraus der Urinanfall be-

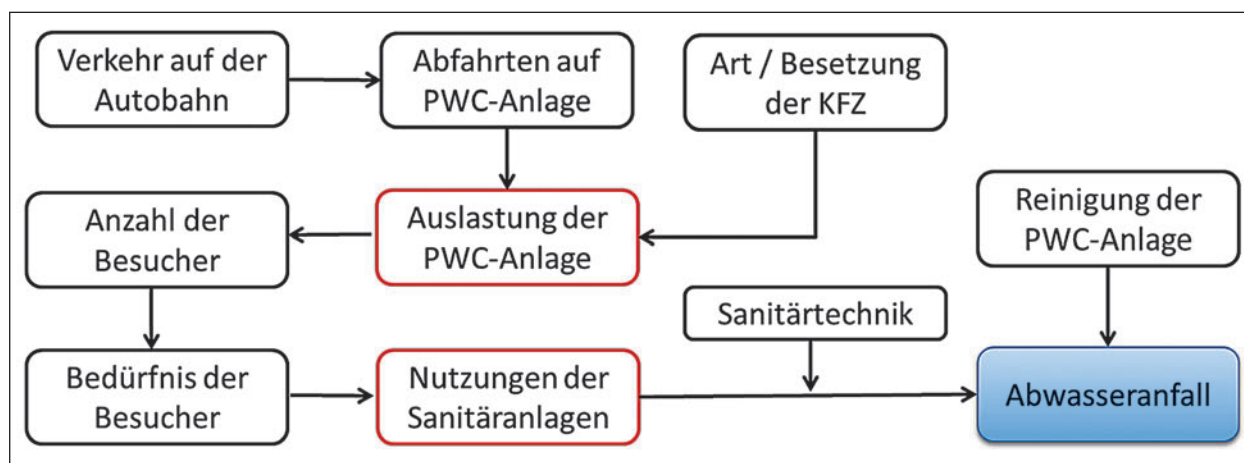
rechnet. Bild 3-29 zeigt den Verlauf der Speicherfüllung. Es wurde ein Urinanfall von 60 l/d errechnet.

An dieser Stelle sei speziell im Hinblick zukünftiger Umsetzungen ergänzt, dass sich die wasserlosen Urinale und der Urinspeicher im Betrieb als unproblematisch erwiesen haben.

## 4 Auslastung der PWC- Anlage

### 4.1 Ziele und Methoden der Verkehrszählung

Der Wasserverbrauch bzw. der Abwasseranfall an PWC-Anlagen ist maßgeblich von der Benutzeranzahl abhängig: je mehr Verkehrsteilnehmer die WC-Anlagen nutzen, desto mehr Wasser wird verbraucht bzw. desto mehr Abwasser fällt an. Die Anzahl der Benutzer ist abhängig von Anzahl und Art bzw. Besetzung der auf die PWC Anlage auffahrenden Fahrzeuge und ist letztlich unmittelbar an das Verkehrsaufkommen der Autobahn gekoppelt. Bild 4-1 zeigt den prinzipieller Zusammenhang von Abwasseranfall auf der PWC-Anlage und Verkehrsaufkommen auf der Autobahn, wobei die unterschiedlichen Bedürfnisse der Nutzer sowie die unterschiedlichen sanitärtechnischen Ausstattungen der PWC-Anlagen als zusätzlich Kriterien berücksichtigt sind.



**Bild 4-1:** Prinzipieller Zusammenhang von Abwasseranfall auf der PWC-Anlage und Verkehrsaufkommen auf der Autobahn

Im DWA M 279 werden für die Bemessung von abwassertechnischen Anlagen nutzerspezifische Stoffachten und Wasserverbräuche (4 bis 8 Liter pro Benutzer) angegeben, doch bleibt die Frage nach der bemessungsrelevanten Benutzerzahl offen. Mit dem Hinweis, dass die Festlegung der bemessungsrelevanten Benutzerzahl schwierig und der Aufwand zur Ermittlung in der Regel nicht wirtschaftlich ist, sollen unter pragmatischen Gesichtspunkten entsprechende Vorgaben vom Auftraggeber gemacht werden.

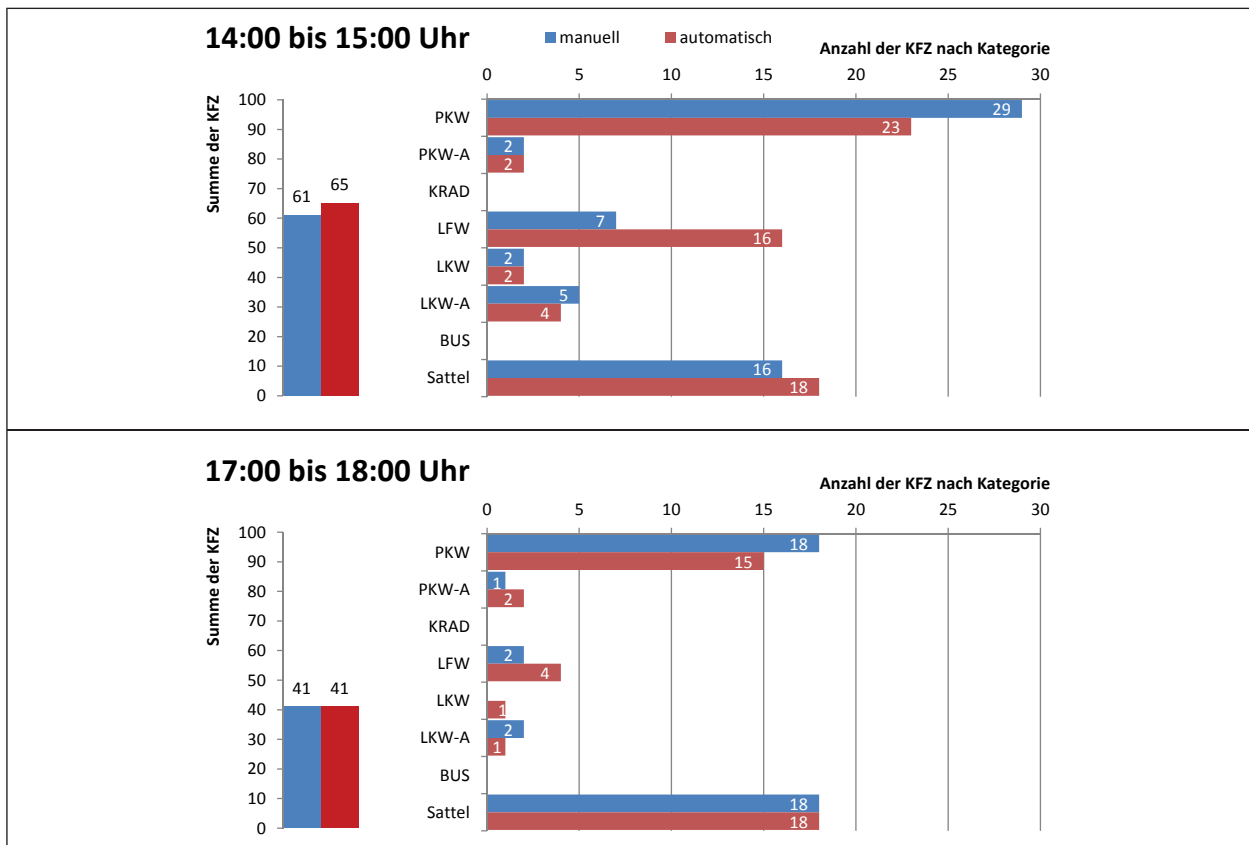
Neben abwassertechnischen Fragestellungen sollte im F&E-Vorhabendeshalb der Anteil des auf die PWC-Anlage auffahrenden Verkehrs  $q_{PWC}$  vom Gesamtverkehr auf der Autobahn  $q_{BAB}$  untersucht werden, um erste Ansätze für die Prognose der Auslastung der PWC-Anlage und letztlich bemessungsrelevanten Benutzerzahlen zu schaffen. Die Daten zum Autobahnverkehr  $q_{BAB}$  wurden anhand der Dauerzählstelle an der Abfahrt Schuby erhoben. Der auf die PWC-Anlage abfahrende Verkehr  $q_{PWC}$  wurde von einem Radarmessgerät gezählt, welches in einem Leitpfosten der Fahrbahn zur PWC-Anlage untergebracht war (vgl. Kapitel 2.4.4).

Das eigens für das F&E Vorhaben vorgesehene Radarmessgerät wurde Mitte Juni 2015 in Betrieb genommen, doch ließen die Ergebnisse einer vorläufigen Auswertung im September 2016 Zweifel an der korrekten Funktionsweise aufkommen. Zum einen war die Anzahl der auf die PWC-Anlage auffahrenden Motorräder (Fahrzeugart Krad) größer als die Anzahl der im gleichen Zeitraum auf der Autobahn fahrenden Motorräder. Zum andern wurden im großen Umfang Fahrräder und verdeckte Kfz detektiert, was angesichts des Untersuchungsstand-

ortes (einspurige Ausfahrrampe auf der Autobahn) nicht plausibel erschien.

Am 17.12.2015 wurde das Radarmessgerät deshalb ausgetauscht, doch kam es – wenn auch im deutlich geringeren Umfang – weiterhin zu unerwarteten Detektionsereignissen. Um deren Ursachen zu ergründen wurde am 18.05.2016 zusätzlich eine manuelle Fahrzeugzählung in der Auffahrt zur PWC-Anlage durchgeführt und die Ergebnisse mit den Daten der automatischen Fahrzeugzählung verglichen (Bild 4-2). Zwar gab es in diesem Zeitraum keine Detektionsereignisse für die fraglichen Fahrzeugarten verdeckte Kfz und Fahrräder sowie nicht klassifizierbare Kfz. Dennoch wurden Unschärfen bei der automatischen Fahrzeugzählung festgestellt, die es bei der Datenauswertung zu berücksichtigen galt.

Wie aus Bild 4-2 hervorgeht, traten sowohl bei der Summe der gezählten Fahrzeuge als auch bei der Fahrzeugzuordnung Unterschiede zwischen automatischer und manueller Fahrzeugzählung auf. Als Ursache für die höhere Summe der automatischen Zählung im Zeitraum von 14:00 bis 15:00 Uhr wurden nahezu zeitgleiche Detektionsereignisse ( $< 1$  s) identifiziert, die offensichtlich nicht von unterschiedlichen Fahrzeugen hervorgerufen werden. Für die Auswertung wurde daraus abgeleitet, alle Detektionen mit Intervallen  $< 1$  s von der Betrachtung auszuschließen. Für die Unterschiede bei der Fahrzeugzuordnung konnte hingegen keine stichhaltige Erklärung gefunden werden. Die Differenzierung in einzelne Fahrzeugarten ist demnach mit großen Unsicherheiten behaftet, doch scheint zumindest eine Unterteilung in Leichtverkehr (LV) und Schwerverkehr (SV) möglich.



**Bild 4-2:** Gegenüberstellung der Ergebnisse von manueller und automatischer Fahrzeugzählung auf der PWC-Anlage am 18.05.2016

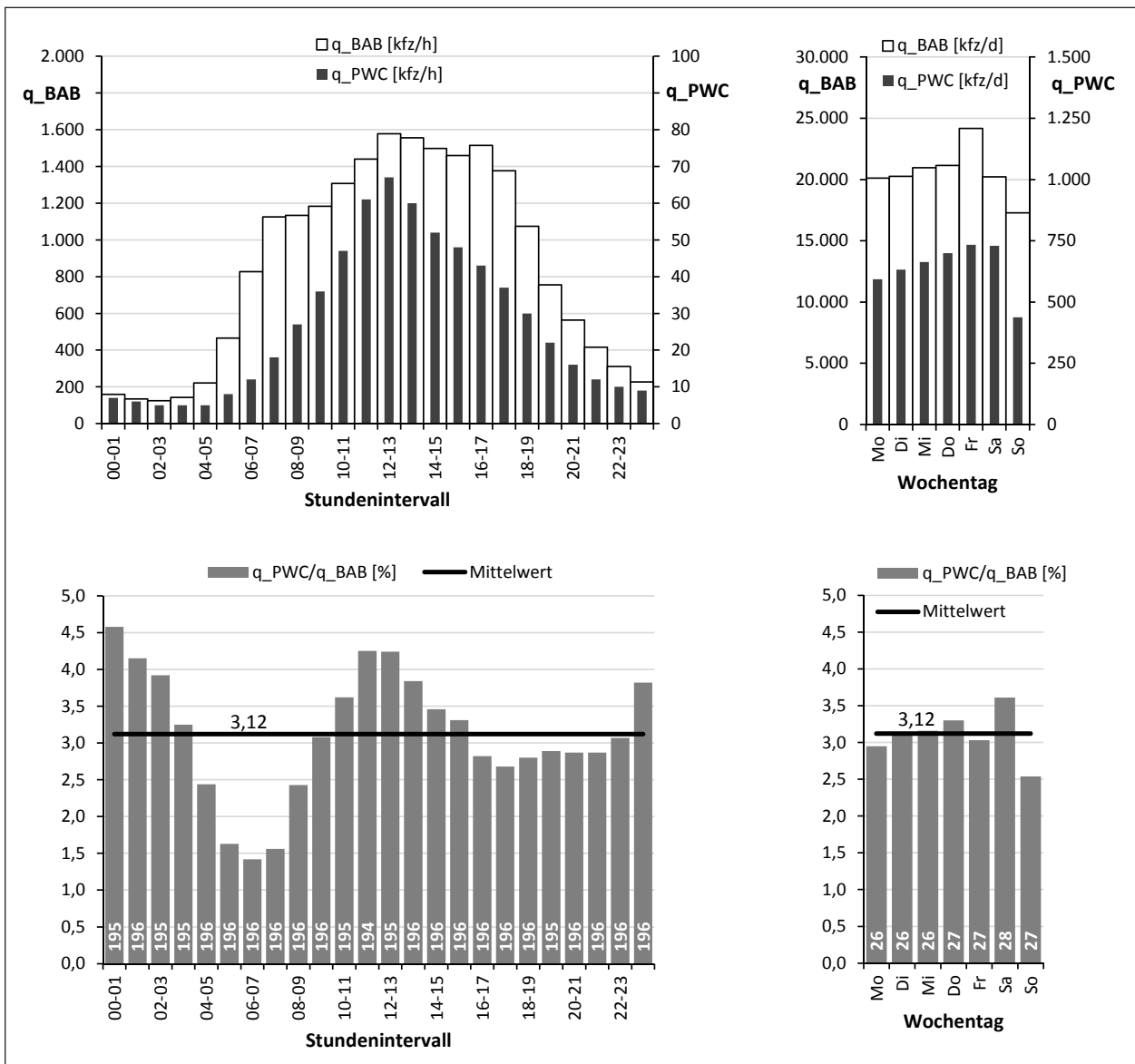
## 4.2 Auslastung der PWC-Anlage im Zeitraum Dezember 2015 bis Juni 2016

Die Auswertung ist prinzipiell für alle Stundenwerte für den Zeitraum 18.12.2015 bis 30.06.2016 möglich, sofern von beiden Messstellen Datensätze vorliegen. Weil zeitweise Störungen an der Dauerzählstelle der Autobahn (9 Betriebsstunden) sowie am Radarmessgerät (67 Betriebsstunden) auftraten, müssen diese Zeiträume (insgesamt 76h) von der Betrachtung ausgeschlossen werden. In Tabelle 4-1 sind für die gültigen Datensätze die kumulierten Zählwerte je Fahrzeugart und Messstationen (d. h. die Summe der Detektionsereignisse) gegenübergestellt. Bezüglich der auf die PWC-Anlagen auffahrenden Fahrzeuge wird zusätzlich dahingehend differenziert, ob die Rohdaten des Radarmessgerätes (original) oder die korrigierten Daten (korrigiert) verwendet wurden. In den letzten Spalten wird der Anteil des auf die PWC-Anlage auffahrenden Verkehrs vom Gesamtverkehr auf der Autobahn in Prozent angegeben ( $q_{PWC}/q_{BAB} \times 100$ ) je Fahrzeugart angegeben. In den letzten Zeilen sind die Werte für die Fahrzeugklassen Leichtverkehr (LV) und Schwerverkehr (SV) zusammengefasst.

Bezüglich der Zählwerte vom Radarmessgerät ist zunächst festzustellen, dass die vorgenommene Korrektur der Datensätze (Elimination aller Detektionsereignisse  $< 1$  s) zu einer Reduzierung der Zählwerte bei allen Fahrzeugarten führt, wobei insbesondere Krad, dKFZ (verdeckte KFZ) und Fahrräder betroffen sind. Letztlich wirkt sich die Korrektur aber nur marginal auf das Gesamtergebnis aus, weil weniger als 2 % aller Detektionsereignisse aus dem Datensatz entfernt wurden.

Über den gesamten Betrachtungszeitraum sind etwa 3,2 % aller Fahrzeuge von der Autobahn auf die PWC-Anlage Jalmer Moor abgefahren. Offensichtlich wird die PWC-Anlage insbesondere vom Schwerlastverkehr (Lkw+LkwA+Sattel+Bus) in Anspruch genommen. Denn im Vergleich zum Leichtverkehr (2,7 %) ist der Prozentsatz des von der Autobahn auf die PWC-Anlage abfahrenden Schwerlastverkehrs (5,5 %) etwa doppelt so hoch.

Aus Bild 4-3 geht hervor, inwieweit die durchschnittliche Auslastung der PWC-Anlage innerhalb der Woche bzw. im Tagesverlauf Schwankungen unterworfen war. Dargestellt sind zum einen die mittleren Stunden- und Tageswerte der Dauerzählstellen



**Bild 4-3:** Schwankungen der Auslastung im Tagesverlauf (links) und Wochenverlauf (rechts)

(oben), zum anderen die resultierende Ganglinie der Auslastung (unten). Zur Berechnung der mittleren Stunden und Tageswerte wurden alle gültigen Zählwerte aufsummiert und durch die Anzahl der von diese Zählwerten repräsentierten Stunden bzw. Tage geteilt. Infolge des zeitweisen Ausfalls der Zählstellen unterscheidet sich die Anzahl der betrachteten Stunden bzw. Tage geringfügig, die aus diesem Grund ergänzend in den unteren Diagrammen mit angegeben ist (weiße Zahlen). Generell liegen der Auswertung die korrigierten Rohdaten des Radarmessgerätes zugrunde. Die beobachteten Schwankungen des Fahrzeugaufkommens auf der Autobahn ( $q_{BAB}$ ) im Tagesverlauf sind nahezu typisch für alle Strecken. Spitzen treten in der Mittagszeit auf, nachts ist das Fahrzeugaufkommen gering. Prinzipiell nimmt auch die Auslastung der

PWC-Anlage in Abhängigkeit vom aktuellen Verkehrsaufkommen der Autobahn zu, doch fahren sowohl in den Nachtsunden (23:00 bis 03:00 Uhr) als auch zur Mittagszeit (10:00–15:00 Uhr) überproportional viele Verkehrsteilnehmer auf die PWC-Anlage ab. Durch Überlagerung dieser Effekte resultiert ein Maximum von  $q_{PWC} = 67$  Kfz/h zwischen 12:00 und 13:00 Uhr. Vergleichsweise wenige Fahrzeuge fahren die PWC Anlage Jalmer Moor zwischen 05:00 und 08:00 Uhr an, was auf einen hohen Anteil von Berufspendlern am Verkehrsaufkommen in diesem Zeitraum schließen lässt.

Gegenüber den durchaus signifikanten Schwankungen der Auslastung im Tagesverlauf fallen die Unterschiede im Wochenverlauf weniger drastisch aus. Tendenziell ist aber eine kontinuierliche Zunah-

Fahrzeugart	BAB	PWC		PWC/BAB [%]	
		original	korrigiert	original	korrigiert
Pkw	2.278.018	54.956	53.382	2,41	2,34
PkwA	74.717	4.797	4.768	6,42	6,38
Lfw	906.667	29.231	28.623	3,22	3,16
Lkw	91.482	6.643	6.549	7,26	7,16
LkwA	88.280	5.231	5.212	5,93	5,9
Krad	12.367	698	558	5,64	4,51
Bus	14.689	345	342	2,35	2,33
Sattel	459.660	25.748	25.741	5,6	5,6
Sonder	45.219	n.b.	n.b.	-	-
nklKfz	n.b.	91	87	-	-
Fahrrad	n.b.	224	181	-	-
vdKfz	n.b.	21	13	-	-
LV	3.316.988	90.018	87.612	2,71	2,64
SV	654.111	37.967	37.844	5,8	5,79
KFZ	3.971.099	127.985	125.456	3,22	3,16

n.b.: nicht bestimmt

Tab. 4-1: Ergebnisse der Fahrzeugzählung vom 18.12.2015 bis 30.06.2016 (4.629 Betriebsstunden)

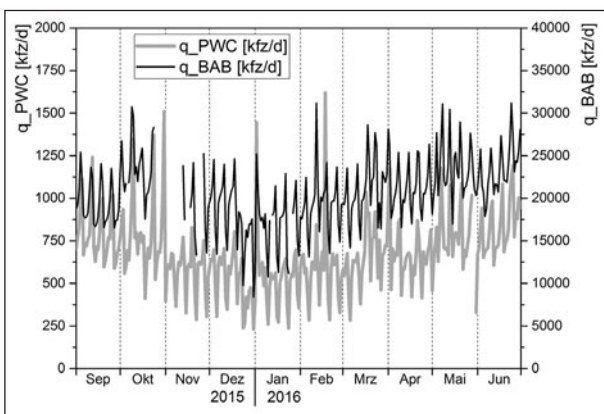


Bild 4-4: Ganglinien zur Verkehrsdichte auf der Autobahn ( $q_{BAB}$ ) sowie in der Abfahrt auf die PWC-Anlage ( $q_{PWC}$ ) im Untersuchungszeitraum

me von Sonntag ( $q_{PWC} = 2,54$  Kfz/d) bis zum Samstag ( $q_{PWC} = 3,61$  Kfz/d) zu erkennen, wenngleich das Verkehrsaufkommen auf der Autobahn Freitags am höchsten ( $q_{BAB} = 734$  Kfz/d) und Sonntags am geringsten ( $q_{BAB} = 438$  Kfz/d) ist. Dass am Sonntag vergleichsweise wenige Fahrzeuge von der Autobahn auf die PWC-Anlage abfahren, ist offensichtlich dem Lkw-Fahrverbot an Sonn- und Feiertagen geschuldet.

Abschließend sind in Bild 4-4 die Ganglinien von Verkehrsaufkommen auf der Autobahn ( $q_{BAB}$ ) und dem Anteil des auf die PWC-Anlage auffahrenden Verkehrs ( $q_{PWC}$ ) dargestellt. Die unterbrochenen Linien zeigen hierbei die Ausfälle der Zählstellen an.

Deutlich sind die prinzipielle Abhängigkeit der Auslastung der PWC-Anlage vom Gesamtverkehr auf der Autobahn sowie die Schwankungen im Wochen- und Jahresverlauf zu erkennen.

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit dem F&E Vorhaben „Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen“ sollten Wirksamkeit und Praxistauglichkeit einer Abtrennung von männlichem Urin aus dem Abwassergemisch evaluiert sowie Optimierungsansätze für die mechanische Vorbehandlung erarbeitet werden. Als Pilotanlage diente die PWC Anlage Jalmer Moor, deren abwassertechnische Sanierung unter Berücksichtigung der für das Forschungsvorhaben notwendigen baulich-technischen Komponenten erfolgen sollte. In der Konsequenz waren die Mitwirkung bei der Sanierungsplanung sowie die Kontrolle der Ausführung wichtige Bestandteile des Forschungsvorhabens, das sich letztlich in vier Phasen gliederte:

- Einbringen in die Planung (Planungsphase)
- Kontrolle der Ausführung (Bauphase)
- Evaluation und Optimierung des Anlagenbetriebs (Untersuchungsphase)

- Ergebnisauswertung und Abschlussbericht (Abschlussphase)

Nicht alle Anforderungen des Forschungsvorhabens fanden beim Bau der Pilotanlage Berücksichtigung, so dass Ziele und Methoden der Untersuchungsphase letztlich den Gegebenheiten der PWC Anlage Jalmor Moor angepasst werden mussten. Das vom 17.07.2015 bis 22.06.2016 durchgeführte Untersuchungsprogramm gliederte sich schließlich in vier Phasen mit unterschiedlichen Schwerpunkten:

1. Untersuchungen zum Schichtenaufbau und der Schwimmschlammdecke im kleinen Absetzbecken bzw. in der kleinen Vorklärung,
2. Eignungstest eines Bogensiebes als mögliche Verfahrensalternative zum konventionellen Absetzbecken,
3. Auswirkungen der Urinseparation auf die biologische Abwasserbehandlung,
4. Dokumentation und Fernüberwachung des Anlagenbetriebs.

Zudem wurden die Daten einer simultan auf der Autobahn sowie in der Auffahrtsrampe zur PWC-Anlage geführten Fahrzeugzählung ausgewertet, um erste Ansätze zur Prognose der Auslastung von PWC-Anlagen zu erhalten.

Im Ergebnis der Untersuchungen zum Schichtenaufbau und der Schwimmschlammdecke im kleinen Absetzbecken lassen sich folgende konstruktive Empfehlungen für die Absetzbehälter von PWC-Anlagen geben:

- Zwischen Wasserspiegelhöhe und der Sohle des Einlauf- bzw. Zulaufrohres sollte ein Mindestabstand von wenigstens 50 cm eingehalten werden, um Verstopfungen im Zulauf durch Schwimmschlamm zu verhindern. Dementsprechend sind Zu- und Ablauf der Vorklärung in der Höhe um mind. 50 cm versetzt anzuordnen.
- Das vollständige Zuwachsen der Wasseroberfläche mit Schwimmschlamm ist durch entsprechende Einbauten (z. B. Tauchrohre) an geeigneter Stelle bzw. Stellen zu unterbinden, um Schwierigkeiten bei der Schlammentnahme zu umgehen.
- Der Auslauf des Vorklärbeckens sollte sich in einer Tiefe zwischen 0,5 und 1,0 unterhalb der Wasserspiegelhöhe befinden, weil hier die geringsten Feststoffkonzentrationen zu erwarten sind. Zusätz-

lich muss der Austrag von aufsteigenden Feststoffen konstruktiv verhindert werden (z. B. verschränkte Platten am Fuße senkrechter Tauchrohre).

Die Untersuchungen zum Eignungstest eines Bogensiebes zeigten einerseits das große Leistungspotential des Bogensiebes gegenüber konventionellen Absetzbecken: In Bezug auf den Rückhalt von partikulären Stoffen sind beide als gleichwertig anzusehen, doch liegt der wesentliche Vorteil des Bogensiebes in der Separation von frischem Abwasser, infolgedessen die Stofffrachten des biologisch weiter zu behandelten Abwasser wesentlich reduziert sind. Andererseits wurde deutlich, dass der hohe Anteil von Toilettenpapier im Abwassergemisch zu Verstopfungen der Siebplatten und somit zu schwerwiegenden Betriebsstörungen führen kann. Tatsächlich stellt die getestete Version eines Bogensiebes keine geeignete Alternative zu einem konventionellem Vorklärbecken dar. Weiterführende Untersuchungen mit einer speziell an die Belange von PWC-Anlagen anzupassenden Konstruktion (geringere Breite, längeres Sieb, evtl. Mazeration des Zulaufs) werden dennoch für sinnvoll gehalten.

Im Ergebnis der Untersuchungen zur Urinabtrennung kann festgehalten werden, dass diese einen signifikanten Beitrag zur Sicherstellung von Ablaufgrenzwerten und insbesondere zur Stabilisierung der Nitrifikation im Bodenfilter leisten kann. Beachtung müssen aber die Wechselwirkungen mit dem vorgelagerten Verfahren zur mechanischen Vorbehandlung des Abwassers finden, die u. U. höhere Ablaufkonzentration bezüglich Phosphor zur Folge haben können. Letztlich stellt die Urinseparation aber eine vergleichsweise preiswerte Lösung zur Kompensation von Belastungsspitzen im Zulauf der Kläranlage dar und ist deshalb grundsätzlich für PWC-Anlagen mit dezentraler Abwasserbehandlung zu empfehlen. Die wasserlosen Urinale haben sich im Betrieb als unproblematisch erwiesen.

Die Dokumentation und kontinuierliche Fernüberwachung des Anlagenbetriebs machen aber deutlich, dass die Urinabtrennung allein kein Garant für das Einhalten von Ablaufgrenzwerten sein kann. Eminent wichtig ist der ordnungsgemäße Betrieb der Gesamtanlage, der solide Fachkunde erfordert und deshalb bevorzugt an eine geeignete Institution/Firma übergeben werden sollte. Auf tägliche Kontrollgänge, wie sie prinzipiell von geschultem bzw. eingewiesenem Personal der Autobahnmeisterei zu leisten wäre, kann letztlich nicht verzichtet werden. Der zeitliche Aufwand dafür lässt sich nur

durch eine geeignete konstruktive Gestaltung der Anlage in Grenzen halten. Bei der Planung zukünftiger Anlagen müssen deshalb die Belange des späteren Betreibers – und somit i. d. R. die Erfahrungen der Autobahnmeistereien – wesentlich stärker Berücksichtigung finden. Die wesentliche Forderung ist schließlich, dass auch vermeintlich einfache Kläranlagen an Autobahnen nach dem Stand der Technik geplant, gebaut und betrieben werden. Die auf der PWC-Anlage Jalmer Moor durchgeführte Sanierungsmaßnahme ist leider ein gutes Beispiel dafür, dass Investitionen in moderne Architektur und Technik nicht zwangsläufig zu geringeren Betriebskosten der PWC-Anlage führen und den Aufwand für Wartung und Instandhaltung deutlich erhöhen können.

Für die Fortsetzung bzw. Wiederholung der durchgeführten Untersuchungen an anderen Stelle sei abschließend darauf hingewiesen, dass die kontinuierliche Fernüberwachung des Anlagenbetriebs sowie die simultane Verkehrszählung auf Autobahn und PWC-Anlage geeignete Methoden sind, um praktisch relevante Ergebnisse zu produzieren. Für die Fernüberwachung der Ablaufqualität wird der Einsatz von  $\text{NH}_4\text{-N}$  Messsonden empfohlen. Unbedingt notwendig ist die Kenntnis der Durchflussdaten für Ablauf und Rezirkulation (weil die Bilanz ansonsten unvollständig ist), zudem sollte die Rezirkulation zumindest in gewissen Grenzen regulierbar sein. Ferner gilt es zu beachten, dass die Messtechnik einer regelmäßigen Kontrolle bedarf. Unabhängig von den technischen Belangen ist es eminent wichtig, dass Änderungen in den Betriebseinstellungen präzise dokumentiert und zeitnah kommuniziert werden, um Fehlinterpretationen von Messergebnissen zu vermeiden.

## Literatur

- ATV-DVWK-M 279 (2005): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) – ehemals Abwassertechnische Vereinigung (ATV) e.V. : Abwasser von Autobahn-Service-Betrieben, Merkblatt 279. unveröffentlichter Entwurf
- DIN 4261-1:2010-10 (2010): Kleinkläranlagen – Teil 1 Anlagen zur Schmutzwasservorbehandlung.
- LONDONG, J., MEYER, D.; HARTMANN, M. (2010): Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen [Bericht zum Forschungsprojekt FE 02.202/2000/ MRB: Einsatz von Pflanzenkläranlagen an unbewirtschafteten Autobahnrastanlagen]. Schriftenreihe der Bast V 195. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

## Bilder

- Bild 2-1: Überblick zu denen bei Planung und Bau der abwassertechnischen Anlage mitwirkenden Akteure im Forschungs- und Bauprojekt
- Bild 2-2: Lösungsansatz für ein Betriebs- und Messkonzept zur Evaluation der Urinseparation und Optimierung der Vorklärung auf der PWC-Anlage Jalmer Moor
- Bild 2-3: Überarbeitete Entwurfsplanung der abwassertechnischen Anlagen auf der PWC-Anlage Jalmer Moor für einen kombinierten Versuchs- und Regelbetrieb
- Bild 2-4: altes (links) und neues (rechts) WC-Häuschen der PWC-Anlage Jalmer Moor
- Bild 2-5: Grundriss des WC-Häuschens mit separaten Urinleitungen
- Bild 2-6: Urinalkabine (links) und rückseitiger Anschluss mit Option zur Urinseparation (rechts)
- Bild 2-7: Verfahrensschema der abwassertechnischen Anlage auf der PWC Jalmer Moor
- Bild 2-8: Unzureichende Abwasserverteilung auf den Bodenfiltern

- Bild 2-9: Eintritt von Grundwasser in den Rezirkulationsschacht (links) und Messschacht (rechts)
- Bild 2-10: Datenlogger (links) und Feldlaborcontainer (rechts) auf der Pilotanlage
- Bild 2-11: Geplante und tatsächlich installierte Online-Messtechnik auf der Pilotanlage
- Bild 2-12: Zählstelle auf der Auffahrtsrampe zur PWC Anlage Jalmer Moor
- Bild 2-13: Störungen in der Datenaufzeichnung der Dauerzählstellen
- Bild 3-1: Handmesssonden (links), Schlamm Spiegelrohr (Mitte) und Schlamm Spiegelhöhe (rechts)
- Bild 3-2: Konfiguration des kleinen Absetzbeckens: eingetauchte Rohre als Messpunkte (links) und Ablauf über Filtersack in IBC-Behälter mit Pumpe (rechts)
- Bild 3-3: Versuchsaufbau und -betrieb zur Messkampagne im kleinen Absetzbecken
- Bild 3-4: Entwicklung von Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert an unterschiedlichen Messstellen (Links, Mitte, Rechts) und Messstiefen (0-2,8 m) im Absetzbecken
- Bild 3-5: Schichtenaufbau der Trübung (als Indikator für den Feststoffgehalt) im Vorklärbecken
- Bild 3-6: Verlauf der Schlamm Spiegelhöhen an den Messpunkten in der Vorklärung
- Bild 3-7: Entwicklung relevanter Abwasserparameter im Ablauf der Vorklärung (stündliche Mittelwerte aus der Online-Messung mit Sonden am Messpunkt rechts in 1m Tiefe)
- Bild 3-8: Mittlere Feststofffrachten im Ablauf der Vorklärung (Feststoffabtrieb)
- Bild 3-9: Entwicklung der Schwimmschlammdecke in der kleinen Vorklärung
- Bild 3-10: Ausführungsplanung des Bogensiebes
- Bild 3-11: Probenahmesystem zur Bilanzierung der durch das Bogensieb separierten Stoffströme
- Bild 3-12: Blick auf die Speicher zur Bilanzierung und Probenahme von Siebdurchgang und Siebgutfiltrat (linkes Bild) sowie in einen mit Sieb gut gefüllten Filtersack (rechtes Bild)
- Bild 3-13: Feststoffkonzentrationen im Ablauf des Bogensiebes im Vergleich zum Ablauf aus dem großen Absetzbecken (große Vorklärung).
- Bild 3-14: Konzentrationen chemischer Parameter im Ablauf des Bogensiebes mit Siebweite 1 mm im Vergleich zum Ablauf aus dem großen Absetzbecken (große Vorklärung).
- Bild 3-15: Massenbilanzierung für das Bogensieb mit 1 mm Siebweite
- Bild 3-16: Konfiguration des Bogensiebes in Phase 1 (Inbetriebnahme)
- Bild 3-17: Modifikation in Phase 2 – einseitig versetztes Prallblech
- Bild 3-18: Modifikation in Phase 3 – Prallblech entfernt, seitlicher Zulauf über Rohrbogen
- Bild 3-19: Modifikation in Phase 4 – Bedüsung und Handgriffe entfernt sowie Zulaufstutzen gekürzt, Zulauf erfolgt nun wieder mittig über an der Sohle dekupierten Bogen
- Bild 3-20: Konfiguration in Phase 4 (links) und 5 (rechts) – Prallblech in größerer Entfernung zum Zulaufstutzen als im Auslieferungszustand
- Bild 3-21: Probenahmestellen bei der Messkampagne zur Evaluation der Urinseparation
- Bild 3-22: Gegenüberstellung der Konzentrationen vom Ablauf der großen Vorklärung im Regelbetrieb (RB) und bei Urinseparation (US)
- Bild 3-23: Ablaufkonzentrationen und Wirkungsgrade der Bodenfilter im Regelbetrieb (RB) und bei Urinseparation (US)
- Bild 3-24: Verlauf von Temperatur, Redoxpotential, NH<sub>4</sub>-N und pH-Wert im Ablauf des Bodenfilters über den gesamten Versuchszeitraum
- Bild 3-25: Kolmationserscheinungen durch Überlastung des Bodenfilters infolge fehlerhafter Verteilung (Schieber in Verteilerschacht defekt)



- Bild 3-26: Online gemessene Daten (Linien) und Analyseergebnisse für Ammonium-Stickstoff (Quadrate) im Ablauf des Bodenfilters nach Inbetriebnahme der Urinseparation
- Bild 3-27: Täglicher Wasser- und Stromverbrauch auf der PWC Jalmer Moor
- Bild 3-28: Schwankungen des Wasserverbrauchs im Tagesverlauf (für 11 Tage ermittelt)
- Bild 3-29: Bestimmung des Urinanfalls mit improvisierter Füllstandmessung im Speicher
- Bild 3-30: Summenlinien für Wasserverbrauch, Niederschlag und Abwasseranfall im Zeitraum vom 15. bis 22 Juni 2016 als Grundlage für die Massenbilanz der PWC-Anlage Jalmer Moor
- Bild 4-1: Prinzipieller Zusammenhang von Abwasseranfall auf der PWC-Anlage und Verkehrsaufkommen auf der Autobahn
- Bild 4-2: Gegenüberstellung der Ergebnisse von manueller und automatischer Fahrzeugzählung auf der PWC-Anlage am 18.05.2016
- Bild 4-3: Schwankungen der Auslastung im Tagesverlauf (links) und Wochenverlauf (rechts)
- Bild 4-4: Ganglinien zur Verkehrsdichte auf der Autobahn ( $q_{BAB}$ ) sowie in der Abfahrt auf die PWC-Anlage ( $q_{PWC}$ ) im Untersuchungszeitraum

## Tabellen

- Tabelle 1-1: Ursprünglich geplanter und tatsächlich verwirklichter Ablauf des Vorhabens
- Tabelle 2-1: Ursprünglich geplantes Betriebsregime der Pilotanlage
- Tabelle 2-2: Analyse des in den Rezirkulations- und Messschacht eindringenden Grundwassers
- Tabelle 3-1: Anlagebetrieb und Untersuchungsschwerpunkte im Überblick
- Tabelle 3-2: Betriebsphasen des Bogensiebes und Untersuchungsprogramm im Überblick
- Tabelle 4-1: Ergebnisse der Fahrzeugzählung vom 18.12.2015 bis 30.06.2016 (4.629 Betriebsstunden)

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2015

V 253: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen

Baier, Kemper

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 254: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw

Wellner, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 255: Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw

Zimmermann, Riffel, Roos

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 256: Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements

Zander, Birbaum, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 257: Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen

Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier

Hantschel, Otto € 18,00

V 258: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten

Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele

€ 18,00

V 259: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 260: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

Hausmann

€ 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen

Alrutz, Bohle, Busek

€ 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten

Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl

€ 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff

€ 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff

€ 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen

Baier, Hartkopf

€ 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen

Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur

Hegewald, Fürneisen, Tautz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften

Pohle, Maier

€ 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe,

Österle, Hoffmann

€ 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur

Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen

Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser,

Geistefeldt, Hohmann

€ 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016

Kühnen

€ 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen

Schulz, Zimmermann, Roos

€ 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen

Grahl, Skottke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer

Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger

€ 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Scotti

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014

Fitschen, Nordmann

€ 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen

Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug,

Vortisch, Leyn, Trapp

€ 23,00

## 2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien

Pollack, Schulz-Ruckriegel

€ 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren

Maier, Berger, Kollmus

€ 17,50

- V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen  
Lippold, Vettters, Steinert € 19,50
- V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten  
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50
- V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten  
Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 285: Praxisingerechte Anforderungen an Tausalz  
Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung  
Kleine, Lehmann € 16,50
- V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle  
Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50
- V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf  
Roos, Zimmermann, Köhler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 289: Verkehrsqualität an verkehrabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen  
Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00
- V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00
- V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50
- V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw  
Burg, Schrempp, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen  
Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50
- V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB  
Maibach, Tacke, Kießig € 15,50
- V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss  
Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50
- V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße  
Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen  
Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysesysteme  
Balck, Schüller, Balmberger, Rossol  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen  
Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

- V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten  
Werkenthin, Kluge, Wessolek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung  
Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB  
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer  
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50
- V 304: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015  
Fitschen, Nordmann € 31,00  
*Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden.* € 15,00
- V 305: Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen  
Hartmann, Londong € 15,50

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

**Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG**  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)