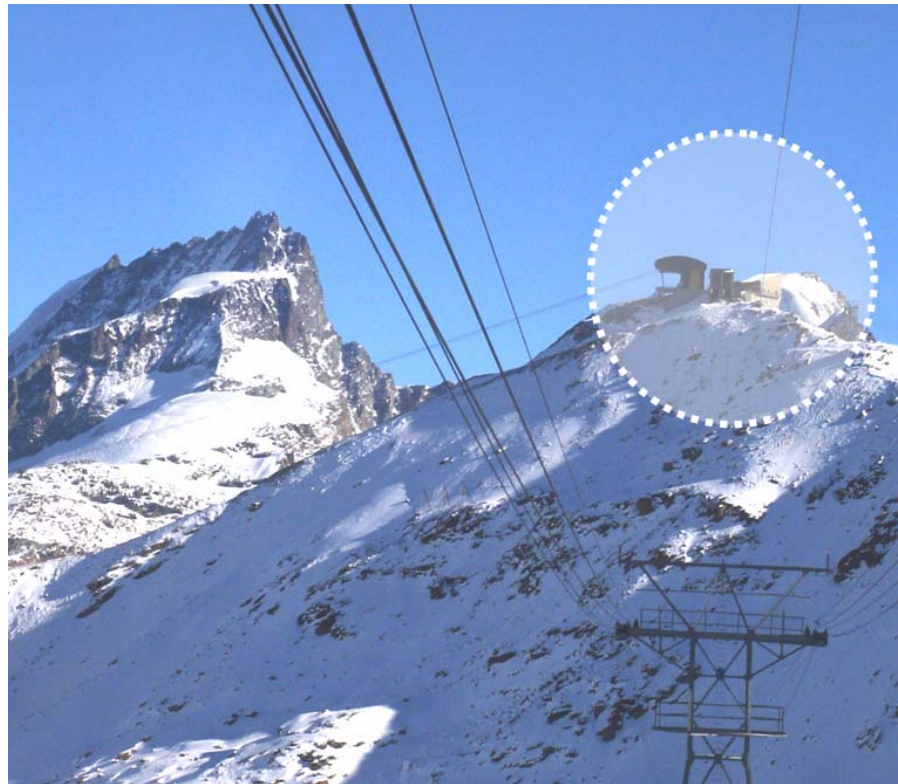



Eawag  
Überlandstrasse 133  
Postfach 611  
8600 Dübendorf  
Schweiz  
Telefon +41 (0)44 823 55 11  
Telefax +41 (0)44 823 50 28  
www.eawag.ch

**eawag**  
aquatic research **ooc**

## Schlussbericht



 Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU



## Dezentrale Reinigung und Wiederverwendung von Toilet- tenabwasser im alpinen Raum

Abschliessender Bericht über die Aktivitäten und  
Untersuchungen im Projekt

terra**Link** gmbh

Dübendorf, November 2006

Ein Projekt  
der **Eawag**  
Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs  
und **terraLink gmbh**  
Umwelttechnik, Konzepte, Werkstoffe  
  
**Zermatt Bergbahnen AG**  
unterstützt durch  
**Bundesamt für Umwelt**  
**(BAFU)**

**Bearbeitung**

**Eawag**

Simone Bützer  
Marc Böhler  
Adriano Joss  
Mandy Ziranke (mikrobiologische Untersuchungen)  
Hansruedi Siegrist

**terraLink GmbH**

Martin Holzapfel

**Zermatt Bergbahnen**

Hermann Mooser

***Titelbild: Bergstation Hochtälli der Zermatt  
Bergbahnen auf 3286 m überm Meer***

# Inhalt

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>HINTERGRUND UND AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>7</b>
2.1	Ausgangslage und Idee	7
2.2	Ziele und Aufgaben	8
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>9</b>
3.1	Abwasserproblematik im alpinen Raum	9
3.2	Bergstation Hohtälli	10
3.3	Abwasseranfall und -zusammensetzung	10
3.4	Anlagentechnik und Infrastruktur	11
<b>4</b>	<b>BETRIEB UND ERGEBNISSE 2005/06</b>	<b>15</b>
4.1	Vorbereitungen und Anfahren der Anlage vor Saisonbeginn	15
4.2	Entfärbung des gereinigten Abwassers	17
4.3	Wasserverbrauch und Aufsalzung des Systems	20
4.4	Nährstoffelimination	22
4.5	Leistungsfähigkeit der Membranen	28
4.6	Hygienisierung des Permeates	30
4.7	Identifizierung und Quantifizierung von Nitrifikanten	31
<b>5</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>SPEZIFISCHE KENNZAHLEN</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>MODELLIERUNG UND SIMULATION</b>	<b>38</b>
7.1	Hintergrund zur Modellierung	38
7.2	Abbildung der Anlage - Datengrundlagen	38
7.3	Kalibrierung	40
7.4	Simulation von Optimierungsszenarien	42
<b>8</b>	<b>GESAMTBETRACHTUNG - UMSETZUNG DES PROJEKTPLANS</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>ÖFFENTLICHKEITSARBEIT</b>	<b>47</b>
<b>10</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND FAZIT</b>	<b>47</b>
<b>11</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>49</b>

## Anhang: **Diplomarbeit**

„Modellierung einer dezentralen Toilettenabwasser-  
reinigungsanlage mit geschlossenem Wasserkreislauf“

bestehend aus

- **Technischer Bericht**
- **Praktikumsbericht**

# 1 Zusammenfassung

Auf der Seilbahnbergstation Hohtälli - gelegen auf 3286 m ü. M. - wurde im Sommer 2004 eine Trocken-WC-Anlage durch eine Spülwasser-Toilettenanlage ausgetauscht. Wesentliche Gründe hierfür waren hygienische Aspekte als auch die gesteigerten Komfortansprüche der Touristen im Skigebiet von Zermatt. Basierend auf einer biologischen Abwasserbehandlung soll die Toilettenanlage mit gereinigtem Abwasser betrieben werden, da am Standort kein Wasser vorhanden ist.

Aufgrund unzureichender Reinigung und erheblicher verfahrenstechnischer Probleme konnte in der ersten Skisaison nur ein wenig zufrieden stellender Betrieb erreicht werden. Die Wiederverwendung respektive der Betrieb der Kläranlage in einem nahezu geschlossenen Systems schien unter anderem aufgrund des sehr einseitigen Abwassers nur schwer möglich.

Vor diesem Hintergrund wurde mit finanzieller Unterstützung des BAFU das vorgestellte Projekt im Zeitraum Mitte 2005 bis Mitte 2006 durchgeführt. Im Projektzeitraum wurde über 10 Monate die Kläranlage in der Winterskisaison unter anderem durch eine Praktikantin zu 100% intensiv betreut.

Da sich die Kläranlage in einer sensiblen hochalpinen Region befindet, sollte neben den betrieblichen Aspekten auch eine minimierte Belastung durch Abwasser der Kläranlage ausgehen. Diesem Aspekt konnte durch eine überraschend hohe Nährstoffelimination Rechnung getragen werden. Das Ziel einer 100%-tigen Nitrifikation der Ammoniumfrachten des Toilettenabwassers wurde erreicht. Im gesamten Betriebszeitraum kam es nicht zu einer Akkumulation von Ammonium im System. In der Hauptsaison betrug die maximale Nitrifikationskapazität des Schlammes rd.  $50 \text{ mgN gCSB}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Aufgrund der spezifischen Betriebsweise bzw. oder eventuell durch die Zusammensetzung des Abwassers (durch die Rezyklierung des gereinigten Abwassers als Spülwasser für die Toiletten), kam es zu einer Veränderung in der Zusammensetzung der Nitrifikantenpopulation. Im Verlauf des Betriebszeitraumes kam es zu einer sukzessiven Verringerung der Nitritoxidation. Dieser Umstand hatte zudem positiven Einfluss auf die gewünschte Entstickung des Abwassers. Der Bedarf an Kohlenstoffverbindungen ist durch die vermehrte Denitrifikation über Nitrit verringert.

Im Rahmen dieses Projektes sollte zudem untersucht werden, ob sich die Nitrifikationsleistung neben den Routineanalysen und Aktivitätstests auch molekularbiologisch durch Quantifizierung der Nitrifikantenpopulation erfassen lässt. Die grosse Streuung innerhalb der einzelnen Daten verhinderte jedoch detaillierte Aussagen zur Populationsdynamik. Deutlich lassen sich nur Unterschiede zwischen Hochsaison und Betriebsende aufzeigen, wo die Reduzierung der Nitrifikationsleistung ebenfalls teilweise durch die Quantifizierung nachgewiesen werden konnte. Unterschiede zwischen den Betriebsdaten, Aktivitätstests und den Quantifizierungsergebnissen weisen jedoch darauf hin, dass mit der verwendeten Gensonde nicht die Hauptpopulation erfasst wurde respektive eine Populationsverschiebung stattgefunden haben muss.

Die geplante Etablierung der Denitrifikation konnte erreicht werden. Die Implementierung dieses Prozesses hat grosse Bedeutung für den Gesamtbetrieb der Anlage. Aufgrund der Denitrifikation konnte der pH-Wert im System im Messbereich zwischen 6.8 und 7.5 stabilisiert werden. Aufgrund der hohen Ammoniumfrachten des Zulaufes kommt es durch die Nitrifikation zu einem starken Verbrauch von Alkalinität, so dass in der ersten Betriebssaison 04/05 es zu einer Versäuerung des Belebtschlammes kam. Dies bewirkte eine starke Reduk-

tion der Nitrifikations- und Denitrifikationsleistung. Durch die Schlammrezirkulation und Abfolge von aeroben und anoxischen Phasen konnte der genannte pH-Wert im System stabilisiert werden. Neben diesem Effekt konnte eine 100% Entstickung des Abwassers erreicht werden. Im Ablauf des MBR bzw. im Permeat findet sich kein Nitrit oder Nitrat, so dass diese Verbindungen nicht durch den Überlauf in die Umwelt abgegeben werden.

Die hohe Denitrifikationsleistung der Anlage konnte durch eine effiziente Hydrolyse respektive durch eine genügende Bereitstellung von leichtabbaubaren Kohlenstoffverbindungen erreicht werden. Dies wurde durch eine entsprechende Vorbehandlung in einem dem MBR vorgeschalteten Reaktor ermöglicht. Durch eine hohe Kontaktzeit von belebtem MBR-Schlamm mit den Inhaltsstoffen des Rohabwassers (Fäkalien, Toilettenpapier) im Grobstofffang (GR) wurde eine effiziente Hydrolyse generiert. Zudem bewirkte ein Rücklaufschlammverhältnis von  $R > 1$ , dass genügend Schlamm für eine vorgeschaltete Denitrifikation bereitgehalten wird, falls kleinere Mengen Nitrit und Nitrat, welches durch die Wiederverwendung von Wasser und dem Rücklaufschlamm in den GR gelangt, zusätzlich denitrifiziert werden kann.

Durch die spezifische Zusammensetzung des Urins gelangt Phosphor in grösseren Mengen in die Anlage. Da Phosphor ein konservativer Stoff ist, akkumuliert dieser im System. Gegen Ende der Saison stieg wie erwartet, jedoch zeitlich verzögert, der gelöste Phosphoranteil auf bis zu 75 mg/l. In der ersten Hälfte der Betriebszeit konnte keine Akkumulation im MBR oder im GR festgestellt werden. Es ist in diesem Zusammenhang zu vermuten, dass der gelöste Phosphor durch vorhandene Eisenverbindungen des Animpfschlammes ausgefällt wurde und sich im System abgelagert hat. In der Trockensubstanz konnten jedoch keine höhere P-Gehalte  $> 3\%$  festgestellt werden.

Aufgrund der zwei Kompartimente der Anlage und einem Rücklaufschlammverhältnisses von  $R \geq 1$ , konnten Phosphor-Akkumulierende-Organismen (PAOs) einwachsen. Der Grobstofffang wurde im Wesentlichen als Anaerobreaktor betrieben. Batch-Versuche können die Bio-P-Aktivität des belebten Schlammes belegen. Somit wird der überwiegende Teil der Phosphorzulauftlast in der Biomasse gebunden und durch Überschussschlammabzug aus dem System ausgetragen. Trotz erhöhter  $P_{\text{gel}}$ -Konzentrationen im Filtrat ist der Austrag in die Umwelt als sehr gering einzustufen, da der überwiegende Anteil des Wassers des eingetragenen Urins verdunstet. So können rd. 85% des Phosphors gebunden respektive aus dem Abwasser entfernt werden.

Die optische Qualität des gereinigten Abwassers in der ersten Betriebssaison für eine Wiederverwendung als Spülwasser war ebenfalls unzureichend. Durch eine starke Gelbfärbung des Spülwassers wurden Spülgänge in den Toiletten ausgelöst, welche die Anlage unnötigerweise zusätzlich hydraulisch belasteten. Im Projekt wurden daher verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Auffärbung untersucht. Es wurden verschiedene Aktivkohlen und Dosiermengen untersucht, so dass abschliessend dem Betreiber nun Art der Pulveraktivkohle, Dosiermengen und die Effizienz der Dosierungen benannt werden können.

Durch die nahezu geschlossene Wasserkreislaufführung kam es im Spülwasser zu einer erwarteten starken Aufsatzung. Am Ende der Skisaison betrug die Leitfähigkeit des Permeates rd. 10mS/cm, welches etwa der Hälfte von reinem Urin entspricht. Die biologischen Prozesse wurden hierdurch nicht negativ beeinflusst. Dennoch sollte zukünftig immer ein Teil Frischwasser im Zulauf sein, um die Aufsatzung auf einem tiefen Niveau zu halten und um Ausfällungen zu vermeiden.

Trotz des Rückhaltevermögens der Membrane und der installierten UV-Desinfektion ist ein 100%-tig desinfiziertes Filtrat unter allen denkbaren Betriebsumständen nicht zu garantieren, so dass auch aus psychologischen Gründen für die Zukunft entschieden wurde, den Frischwasserzulauf über die Handwaschbecken zu generieren. Die Desinfektion des Filtratspeichers soll nur noch manuell über Javelwasser-Zugaben in den Speicher erfolgen.

Der im Reinigungsprozess anfallende Überschussschlamm hat durch die neue Betriebsweise einen hohen Stabilisierungsgrad und kann problemlos durch die neu eingeführte Schlammwässerung mit Filtersäcken effizient entfernt und entsorgt werden. Eine geplante Automatisierung wird zusätzlich diese Arbeit erleichtern.

Im Rahmen des Projektes wurde zudem das System der Kläranlage mit einer Simulationssoftware abgebildet und das Kläranlagenmodell auf Basis der Betriebsdaten kalibriert. Mit Hilfe der dynamischen Simulation konnten Optimierungsvorschläge abgeleitet werden. So sollte die Permeabilität respektive die absolute Filtrationsleistung der Membranen nicht zu hoch sein, da sonst die aerobe Kontaktzeit des Abwassers zu gering ist und nur eine unvollständige Nitrifikation erreicht wird. Weiterhin können Aussagen über die Notwendigkeit und Höhe der Schlammrückführung gemacht werden. Das Rücklaufschlammverhältnis (RV) sollte nicht unter 1 (besser  $RV = 2$ ) eingestellt werden, da sonst die gewünschte BioP-Aktivität des Schlammes nicht erreicht werden kann bzw. keine optimale biologische Vorbehandlung im GR erfolgt.

Resultierend aus dem vorliegenden Projektbericht, in dem alle Resultate und Aktivitäten im Projekt dokumentiert sind, wurde ein Betriebshandbuch angefertigt. Dieses ist als ein zentrales Projektergebnis zu werten, da mit diesem dem Betreiber, die Zermatt Bergbahnen AG, ein wertvolles Hilfsmittel an die Hand gegeben wird, um die Kläranlage in der Wintersaison erfolgreich zu betreiben.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass die Projektpartner mit den erreichten Zielen im Projekt vollumfänglich zu frieden sind, da in Teilen die Erwartungen übertroffen wurden (Beispiel Nährstoffelimination). Für den Industriepartner haben sich aus dem Projekt bereits neue Projekte mit ähnlicher Aufgabenstellung ergeben.



## 2 Hintergrund und Aufgabenstellung

### 2.1 Ausgangslage und Idee

Die Firma terraLink GmbH in Zusammenarbeit mit Zermatt Bergbahnen haben im Herbst 2004 auf der Kopfstation Hohtälli einen Membranbioreaktor zur Aufbereitung und Wiederverwendung von Toilettenabwasser mit geschlossenem Wasserkreislauf in Betrieb genommen. Da der Standort nicht am Wassernetz angebunden ist, soll der Toilettenbetrieb mit möglichst geringer Frischwasserzufuhr betrieben werden.

Während der ersten Saison hatte sich gezeigt, dass mit der vorhandenen Reaktor-Konfiguration und Betriebsweise die gewünschte Reinigung nicht erreicht werden konnte. Neben einer unzureichenden biologischen Reinigung des Toilettenabwassers hatten sich auch im Betrieb zur Wiederverwendung des Abwassers grosse betriebliche Probleme gezeigt.

Um einen gesicherten Betrieb der biologischen Reinigung des Abwassers für kommende Wintersaisonen gewährleisten zu können, hat sich die Firma terraLink GmbH an die Eawag zur Evaluierung von Strategien zum Betrieb und zur Entwicklung einer geeigneten Verfahrenstechnologie für die Membrananlage gewandt.

Aufgrund der speziellen Lage der Bergstation (hochalpiner Raum sowie für weitere Standorte) wäre die Weiterentwicklung und Optimierung eines Systems zur biologischen Reinigung und weiteren Nutzung des gereinigten Wassers ohne (resp. mit minimalem) Frischwasserzufuhr von grossem Nutzen. Dies begründet sich u. a. in der Tatsache, dass Frisch- respektive Schmelzwasser zum Betrieb von Bergstationen in derartigen extremen Hochlagen wenig bis gar nicht vorhanden ist, die Wiederverwendung also einen erheblichen Beitrag zur Erniedrigung des Wasserverbrauchs erbringen kann. Des Weiteren könnte eine effektive weitergehende Reinigung des Abwassers eine erhebliche Entlastung von Nährstoffen und pathogenen Keimen im Bereich der Versickerung bewirken und somit eine Schonung des empfindlichen alpinen Raumes generieren. Auch ist aus wirtschaftlichen und hygienischen Aspekten eine Entsorgung des Abwassers am Entstehungsort von grossem Vorteil, da andernfalls die gesammelten Fäkalien und Urin bis in die im Tal befindliche Kläranlage mit der Seilbahn oder mittels Kanal transportiert werden müssten. Die Zermatter Bergbahnen erhalten somit ein sicheres und umweltschonendes System zur Abwasserentsorgung beim Betrieb des Skigebietes, welches zudem autark von einer Wasserversorgung wird.

Da die Eawag innerhalb des Projektes weiteres Detailwissen und Erfahrung zur Aufbereitung dieses speziellen Abwassers (im Wesentlichen Urin, hoher Salz-, Stickstoff- und Phosphorgehalt) erzielen wollte, waren neben der allgemeinen Beratung auch Aspekte zur Erarbeitung von Grundlagenwissen von Interesse. Die Membrantechnologie allgemein gewinnt zunehmend an Bedeutung auch in der Schweiz, so dass hier neues verfahrenstechnisches Wissen und Erfahrungen erarbeitet werden sollte. In einer Gesamtbetrachtung ist daher die Entwicklung und Optimierung eines gut funktionierenden dezentralen Reinigungssystems mit anschliessender Wiederverwendung des gereinigten Abwassers von grosser Bedeutung für die nachhaltige Nutzung des alpinen Raumes, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die aufgezeigte Problematik hundertfach im gesamten Alpenraum anzutreffen ist (Alpenschutzkonvention). In einer globaleren Betrachtung kommt zudem der Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser zunehmend eine wichtigere Rolle zu (z.Bsp. aride Gebiete).

## 2.2 Ziele und Aufgaben

Aufgrund der Ausgangslage und individuellen Zielsetzungen der Projektpartner ergaben sich nachfolgende Aufgaben und Zielsetzungen, die in einem Projektplan umgesetzt wurden:

- Klärung der Grundsatzfrage, wie der Betrieb eines nahezu geschlossenen Kreislaufes in Zusammenhang mit einer Biologie möglich ist
- Gewährleistung eines störungsfreien Betriebs der Kläranlage in der Wintersaison 2005/06 und folgender Jahre mit weitestgehender vollständiger Nitrifikation/Denitrifikation der Stickstofffrachten und möglichst grosser P-Elimination
- Erfassung der Nährstoffflüsse (Stickstoff und Phosphor) über die gesamte Anlage
- Stabilisierung und Erfassung der Betriebskenngrössen – Routinebetrieb der Anlage - Erarbeitung von Kenngrössen
- Maximierung der Reinigungsleistung der Anlage
- Überprüfung von Methoden zur Entfärbung des Permeates (Adsorber, Ozon)
- Erarbeitung von Handlungsanweisungen zum optimierten Betrieb (Handbuch mit Betriebsanleitung) für nachfolgende Jahre
- Aufrechterhaltung der Biologie im Sommerhalbjahr bei richtiger Betriebsweise und Vorbereitung der Biologie für die Skisaison
- Beobachtung des Langzeitverhaltens der Biomasse im Winter- und Sommerbetrieb
- Anfertigen einer Anleitung zum Aufstarten der Anlage für den Wintersaisonbeginn
- Erarbeitung von Detailwissen und weiterer Erfahrung zur Reinigung und Wiederverwendung des speziellen Abwassers
- Schaffung einer Referenzanlage zur Behandlung von Abwasser in extremen Höhenlagen
- Wissenstransfer der erarbeiteten Ergebnisse



## 3 Grundlagen

### 3.1 Abwasserproblematik im alpinen Raum

Die Nutzung und Bewirtschaftung der Alpen in höheren Lagen ist vielfältig und hat sich im letzten Jahrhundert zunehmend von einer rein landwirtschaftlichen Nutzung hin zu einer verstärkten touristischen Bewirtschaftung entwickelt. Allein der Schweizer Alpenclub (SAC) betreibt 153 Berghütten mit jährlich rd. 300`000 Übernachtungen und etwa 1`000`000 Tagesgästen (Bochtler, 2003).

Im Zuge dieser Entwicklung wurde erkannt, dass eine ganzheitliche Betrachtung dieses Natur- und Wirtschaftsraumes vordringlich ist. Um diesem Ansehen nach zukommen, wurde ein internationales Übereinkommen in Form der Alpenkonvention zum Schutz und zur Förderung der nachhaltigen Entwicklung in den Alpen abgeschlossen. Diese Konvention legt ferner großes Augenmerk auf die Sicherung der wirtschaftlichen und kulturellen Interessen der einheimischen Bevölkerung in den Unterzeichnerstaaten.

Berghütten, Einzelanwesen und Bergstationen in alpiner Lage befinden sich in einer sensiblen Umgebung. Die gesonderte Lage der Infrastruktur bereitet für die Ver- aber auch für die Entsorgung oftmals Probleme.

Ein wesentlicher Aspekt stellt die Versorgung und Entsorgung von Wasser dar.

Die Versorgung mit Frisch- bzw. Schmelzwasser oder Quellwasser ist nicht immer gegeben, da gerade im Winter dieses Wasser energieaufwendig aufbereitet werden muss. Andererseits steht in extremen Hochlagen oftmals kaum oder kein Wasser zur Verfügung, da der Untergrund aus Fels besteht (keine Wasserspeicherung) oder permanent gefroren ist. Die Versorgung über Leitungen und Pumpstationen ist technisch als sehr aufwendig und als kostenintensiv zu bezeichnen (Bau und Unterhalt).

Die Entsorgung des produzierten Abwassers stellt ebenfalls ein Problem dar. Durch Anreicherung von Schmutzstoffen in Form von Nährstoffen aber auch von toxischen Substanzen sollte das Abwasser nicht in Vorfluter (wenn überhaupt vorhanden) abgeleitet oder in den Untergrund versickert werden. Auch würde ein derartiges Vorgehen den nachhaltigen Schutz von unterhalb liegenden Trinkwasserspeichern (Grundwasser oder Oberflächengewässer) gefährden. Eine negative Beeinflussung des aquatischen Systems wäre die Folge. Neben der genannten Verschmutzung ist in diesem Zusammenhang insbesondere der hygienische Aspekt zu nennen, da pathogene Keime ins Trinkwasser vermehrt eindringen könnten.

Eine Ableitung ins Tal zur Reinigung in einer ARA über Leitungen wie auch bei der Wasserversorgung ist für viele Standorte als aufwendig einzustufen. Werden andere Transportmittel genutzt, ist dieses aus hygienischen Gründen und der Wirtschaftlichkeit als kritisch zu bewerten.

Wird eine Behandlung vor Ort (dezentral) angestrebt, ergeben sich oftmals Probleme durch einen stark saisonal abhängigen Anfall des Abwassers. Konzentrierte und stark schwankende Abwasserfrachten können oftmals von einer herkömmlichen Behandlungsanlage nur ungenügend verarbeitet werden, da in Fällen einer biologischen Behandlung die benötigte Biomasse nicht ausreichend oder nicht auf die sprunghaften Veränderungen angepasst ist. Weiterhin können sehr tiefe Temperaturen z.B. im Winter die Prozesse erheblich verlangsamen.

### 3.2 Bergstation Hohtälli

Das Gornergrat-Skisportgebiet ist eingebunden im Skigebiet Matterhorn Ski Paradise, welches zu den grössten Wintersportgebieten der Schweiz zählt. Innerhalb dieses Skigebietes liegt auf 3286 m ü. M. die Seilbahnbergstation Hohtälli (vgl. Abbildung 1), welche als Umstiegstation bzw. als Ausgangspunkt für die Aktivitäten im Wintersportgebiet dient. Die gesonderte Lage und Höhenlage der Bergstation zeigt bereits auf, dass eine Ver- und Entsorgung mit hohem Aufwand betrieben werden muss.



**Abbildung 1** Lage der Bergstation Hohtälli im Skigebiet Gornergrat (Zermatt, Kanton Wallis)

Neben der Infrastruktur zum Betrieb der Seilbahn befindet sich auch eine Toilettenanlage für die Passagiere in der Station. Diese wird von etwa 10% bis 15% der Passagiere genutzt, wobei die Verweilzeit auf der Station und das damit verbundene Verhalten der Touristen in der Saison variieren kann. Die Besucherzahl kann in der Spitze in der Hochsaison bis auf rd. 5'000 Personen täglich ansteigen.

Bis zur Wintersaison 2004/05 wurde in der Station eine Trockentoilette betrieben, in der mit Hilfe einer Absackanlage anfallendes Urin und Fäkalien gesammelt wurde. Aufgrund des hohen Betriebs- und Personalaufwandes für Reinigung und Abtransport, erheblicher Geruchsemissionen und der generell höheren Akzeptanz und Komforts einer Spülwassertoilette wurde die Toilettenanlage umgebaut.

### 3.3 Abwasseranfall und -zusammensetzung

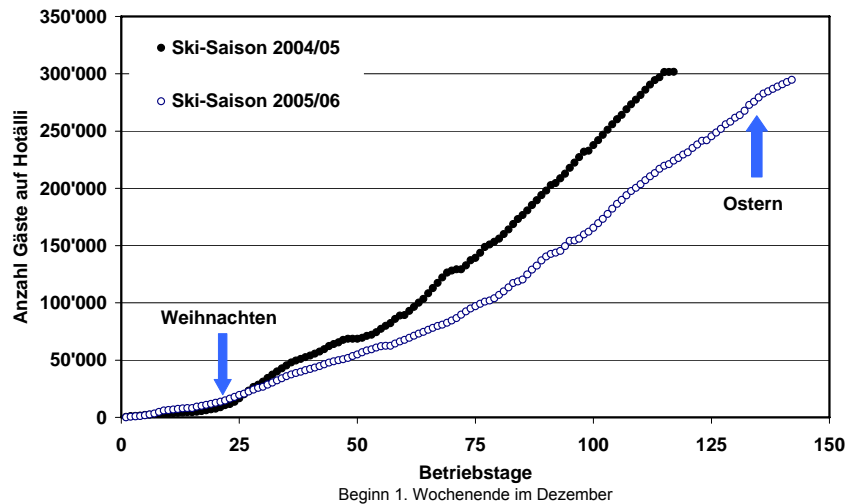
Das anfallende Abwasser der Toilettenanlage ist in Zusammensetzung und im zeitlichen Anfall sehr spezifisch.

Der Skibetrieb ist stark von den Witterungsbedingungen abhängig. Schneefallmengen, Nebel und Windgeschwindigkeiten beeinflussen wesentlich das Verhalten der Wintersportler bzw. den Betrieb der Anlagen. Der Abwasseranfall kann daher zwischen 0 und 2 m<sup>3</sup>/d schwanken. Die Tagesdynamik des Anfalls spielt sich im Wesentlichen zwischen 10:00 vormittags und 16:00 nachmittags ab. Zwischen 17:00 und 8:00 werden die Toiletten nicht benutzt.

Auch der Vergleich der zwei bisherigen Wintersaisonen untereinander zeigt deutlich einen Unterschied in der Entwicklung der Belastung der Anlage. In der Ski-Saison 2004/05 stieg die Besucherzahl und die damit verbundene Belastung der Kläranlage durch gute Schnee-

verhältnisse deutlich rascher an und war gegen Ende März bereits 25% höher als im Vergleichszeitraum 2005/06 (Abbildung 2).

Die Zusammensetzung des Abwassers ist sehr einseitig. Es besteht aus Urin, Toilettenpapier und wenig Fäkalien. Dies bedingt hohe Nährstoff- und Salzkonzentrationen. Eine Verdünnung des Abwassers erfolgt nur über die Wasserspülung der Toiletten, wobei das Spülwasser durch das Rezyklieren bereits hohe Salzgehalte aufweist.



**Abbildung 2** Vergleich der Entwicklung der Besucherzahlen in der Wintersaison 04/05 und 05/06

Spezifische Angaben über den Anfall und die Zusammensetzung des Abwasser erfolgen im Ergebnisteil dieses Berichtes und ergeben sich aus den Stoffstromanalysen (Massenbilanzen, vgl. Abschnitt 6).

### 3.4 Anlagentechnik und Infrastruktur

Die auf der Kopfstation Hohtälli installierte Anlagentechnik (vgl. Abbildung 3) zur Aufbereitung und Wiederverwendung der anfallenden Toilettenabwässer besteht im Wesentlichen aus 3 Behältern mit zugehöriger Maschinenteknik. Die gesamte Anlage befindet sich im Kellergeschoss der Seilbahnstation, wo sich auch die Maschinenteknik der Seilbahn befindet. Hierdurch bedingt ergibt sich eine hohe Raumtemperatur sowie eine geringe Luftfeuchtigkeit am Standort der Anlage. Durch die Höhenlage bedingt ergibt sich zudem lokal ein Luftdruck mit kleiner Sauerstoffsättigungskonzentration.

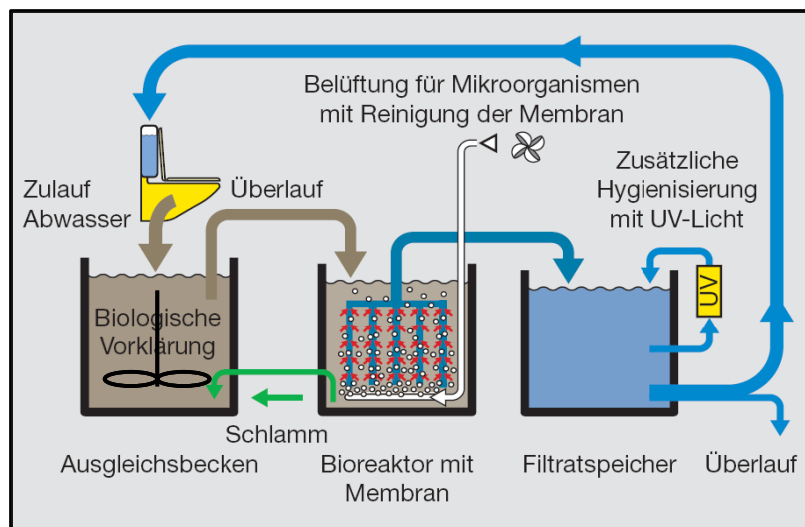
Die Anlagentechnik wurde vor und im Verlauf des Projektes angepasst und erweitert. Die nachfolgende Beschreibung stellt die derzeitige Situation und Funktionsweise dar. Es werden die Modifikationen und die neue angepasste Betriebsweise der Kläranlage erläutert.

#### ▣ Grobstoffabscheider (GR)

Ein erster Reaktor von 3.8 m<sup>3</sup> (maximale Füllung) dient als Grobstoffabscheider (GR) und als Ausgleichsbecken für das anfallende Toilettenabwasser der 4 Toiletten (2 Damen und 2 Herren). Über eine Zeitschaltuhr wird der Behälter in Abständen mit einer Umwälzpumpe durchmischt. Ziel der Durchmischung ist sowohl die mechanische Zerkleinerung von organischen Feststoffen (mechanisch, Fäkalien und Papier) als auch die damit verbesserte Hydrolyse von Abwasserinhaltsstoffen (biologisch), um diese den biologischen Prozessen besser verfügbar zu machen. Neben dem Abwasser gelangt auch Belebtschlamm als Rücklauf aus dem Membranbioreaktor (MBR) in den GR. Die Rücklaufschlammmenge ist einstellbar und

wird frachtabhängig geregelt (über die Anzahl der Filtrationszyklen). Aufgrund der Aufenthaltszeit des Abwasser-Belebtschlammgemisches von 0.5 bis 1 Tag im GR wird eine nahezu vollständige Ammonifikation der Harnstoffzulaufkrachten erreicht. Neben diesen wichtigen Aufgaben übernimmt der GR auch die Funktion einer vorgeschalteten Denitrifikation. Da über die Wiederverwendung des Abwassers (als Spülwasser) aber auch über den Rücklaufschlamm Nitrit und Nitrat in den GR gelangen kann, findet hier ebenfalls eine Denitrifikation statt, wenn im MBR nicht vollständig denitrifiziert wurde. Dieser Denitrifikationsanteil ist jedoch als gering zu bewerten, da im Wesentlichen anaerobe Verhältnisse im GR vorliegen. Durch diese Randbedingungen bzw. Betriebsweise fungierte daher die Behandlungsstufe als Anaerobbecken und generierte daher eine erhöhte biologische Phosphorelimination der Anlage.

**Anmerkung / Empfehlung zum GR:** Der Funktion der Speicherung respektive Pufferung des zufließenden Abwassers kommt eine wichtige Rolle zu. Eine ausreichende Vermischung und Kontaktzeit des Abwassers mit Belebtschlamm aus dem MBR ist zentral für eine effektive Vorbehandlung des Toilettenabwassers und kann die biologischen Reinigungsprozesse in der Gesamtanlage wesentlich verbessern. Ein anfänglich eingehängter Filterkorb begrenzte die maximale Absenkung bzw. Entleerung des GR. Im Weiteren Verlauf wurde der kurze Filterkorb gegen einen längeren ausgetauscht, so dass das effektive Speichervolumen vergrößert werden konnte (Verlängerung der Aufenthaltszeit). Das derzeitige minimale Niveau bzw. Volumen von rd. 800l sollte beibehalten werden, da so eine vergrößerte Pufferung des Abwasseraufkommens ermöglicht wird. Die Durchmischung von Abwasser und zurück geführten Schlamm ist wichtig. Die betriebene Umwälzpumpe lief in Abständen in der Skisaison, so dass hier durch beding neben der Durchmischung auch eine Zerkleinerung der Feststoffe erfolgte. Des Weiteren wurde die Bildung einer festen Deckschicht an der Oberfläche des GR verhindert. Die in zeitlichen Abständen erfolgte Umwälzung sollte beibehalten werden. Gegebenenfalls könnte die Umwälzpumpe durch ein Rührwerk ersetzt werden, da ein solches energiesparender ist, jedoch andererseits weniger gut die Feststoffe zerkleinert. Seitens der Eawag wird eine robuste Pumpe mit Schneidwerk empfohlen.



**Abbildung 3** Anlagenschema der Kläranlage Hochtälli (Stand Wintersaison 2005/06)

#### Membranbioreaktor (MBR)

Über ein Spaltsieb ( $\varnothing$  2.5 mm) und eine taktgesteuerte Pumpe gelangt das Abwasser chargenweise in den zweiten Behälter dem MBR ( $3.6 \text{ m}^3$ ), der im Wesentlichen die biologische Reinigung des Abwassers mittels Biomasse (Belebtschlamm) vornimmt. Die Aktivierung des Zulaufs wird über das Niveau im GR ausgelöst. Während der 30-minütigen Beschickung des MBR wird nicht belüftet und es erfolgt in dieser Phase die Denitrifikation des Nitrts/Nitrats, welches vorher in der 30-minütigen belüfteten Phase im MBR durch Nitrifikation produziert wurde. Bevor das Wechselspiel von belüfteten und unbelüfteten Phasen beginnt, muss auch im MBR erst ein gewisses Füllniveau überschritten werden. Somit beginnt der MBR erst zeitversetzt das Niveau durch Filtration über die Membranen im 30/30 Takt (entspricht 1 Zyklus) abzubauen. Da wie beschrieben erst in beiden Reaktoren (GR und MBR) ein vorgegebenes Füllniveau erreicht werden muss, um die Pump- respektive Filtrationsvorgänge auszulösen, beginnt der Betrieb der Anlage erst gegen Mittag und kann in Abhängigkeit des Abwasseranfalls und der Filtrationsleistung der Membranen erst in den Nachtstunden enden. Durchschnittlich werden 10 bis 14 Zyklen benötigt, um die gewünschten Ausgangsniveaus im GR und MBR für den neuen Betriebstag zu erreichen.

Im Projektzeitraum wurden permanent 3 Membranmodule mit jeweils  $6.2 \text{ m}^2$  Membranfläche betrieben. Zur Reinigung der Membranplatten und zur Sauerstoffversorgung der Bakterien dient ein intermittierend betriebenes Gebläse (vgl. Abbildung 4) mit feinblasiger Belüftungseinheit. Die im Strömungsfuss unterhalb der Membranmodule angeordnete Belüftung erzeugt ein turbulentes Luft-/Wassergemisch, das quer zu den Membranoberflächen im Filtermodul aufsteigt. Diese Cross-Flow Strömung trägt ständig die Partikel von der Membranoberfläche ab und verhindert die Bildung einer filtrationshemmenden Deckschicht. Jede Plattenmoduleinheit verfügt über eine separate Permeatpumpe, welche den notwendigen Unterdruck in den Membraneinheiten erzeugt. Das Permeat gelangt in einen Speicherbehälter. Aufgrund der Porengrösse der Membran (35 nm) ist das Filtrat partikel- und bakterienfrei und nahezu keimfrei.



**Abbildung 4 Membranbioreaktor (wasserbefüllt) mit zwei Membranmodulen (links belüftet und rechts unbelüftet) zur Filtration des gereinigten Abwassers**

#### Filtratspeichertank und Hygienisierung (UV-Lampe)

Damit bei längeren Standzeiten der Anlage das Permeat nicht eine ungenügende bakterielle Qualität erreicht, wird es im Kreislauf über eine UV-Lampe geführt, welche durch ultraviolette Lichtstrahlung sämtliche noch verbliebene oder eingetragene Keime abtötet. Um hinreichend Filtrat vorhalten zu können, wurde im weiteren Verlauf der Saison ein zusätzlicher Pufferbehälter an den Filtratspeicher angeschlossen. Das so gewonnene gereinigte Abwasser im



Filtratspeicher und Pufferbehälter (zusammen 3.2 m<sup>3</sup>) kann daher gefahrlos zum Spülen der Toilettenanlage wieder verwendet werden. Gespeist werden die Toilettenspülkästen über ein Hauswasserwerk. Wird mehr Filtrat produziert, als in den Filtratspeichern gesammelt werden kann, verlässt gereinigtes Abwasser über den Überlauf die Anlage und versickert im Umfeld der Bergstation.

#### ➤ zusätzliche Dosier- und Messeinrichtungen

Für das Monitoring und das Anfahren der Kläranlage wurden Dosier- und Messeinrichtungen seitens der Eawag installiert, welche in Teilen in der Anlagetechnik dauerhaft verblieben sind.



**Abbildung 5** Abwasserlabor für Kontrolluntersuchungen in einem Kommandoraum der Seilbahn

Zur Dosierung von Nährlösungen wie Zucker und Ammonium wurden zwei Dosiereinheiten eingerichtet. Zur Erfassung der Massenflüsse und des Energieverbrauches wurden Stromzähler und eine Wasseruhr installiert. Um Aussagen über die Funktionstüchtigkeit (Permeabilität) der Membranmodule machen zu können, wurden zudem drei Druckdifferenzmesser eingebaut. Zur Analytik der Abwasserinhaltsstoffe und zur Bestimmung der Belebtschlammaktivität wurde ein Betriebslabor mit zwei Batchreaktoren eingerichtet (Abbildung 5).

#### ➤ Überschussschlammentnahme und -entwässerung

Der Zuwachs an Biomasse erfordert die Entnahme von Überschussschlamm. Um möglichst geringe Mengen entsorgen zu müssen, ist eine Entwässerung von Vorteil. Hierzu wurden zwei Entwässerungsvorrichtungen integriert. Die Entwässerung erfolgt über Filtersäcke, welche in speziellen Einspannvorrichtungen (entwickelt und erstellt seitens der Eawag) über den Reaktoren aufgehängt sind. Abtropfendes Filtrat gelangt somit direkt zurück in den Reaktor (vgl. **Abbildung 6**). Als Abzugseinrichtung dient die Rücklaufschlammpumpe, die manuell umgehängt wird.



**Abbildung 6** Entwässerungssack mit Aufhängevorrichtung zum Abtropfen über dem GR

## 4 Betrieb und Ergebnisse 2005/06

Wie bereits aufgezeigt wurde die Verfahrensführung gegenüber dem Winter 2004/05 gänzlich umgestellt und im Betriebsverlauf optimiert. Die Arbeiten vor Ort wurden im Wesentlichen in Vollzeitstellung durch eine Praktikantin getätigt. Tägliche Kontrollen und Optimierungen wurden vor und in der gesamten Wintersaison durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen wurden parallel an der Eawag und vor Ort fortlaufend diskutiert und in entsprechende Handlungsanweisungen umgesetzt. In enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit den Projektpartnern (Zermatt Bergbahnen AG und der terraLink GmbH) wurde zudem die Praktikantin vorbildlich unterstützt. Im Einzelnen werden nachfolgend die Optimierungsmassnahmen und die damit verbundenen Untersuchungen und Aktivitäten im Projekt vorgestellt.

### 4.1 Vorbereitungen und Anfahren der Anlage vor Saisonbeginn

#### /// Animpfen mit belebtem Schlamm

Am Ende der Wintersaison 2004/05 wurde die Anlage gereinigt und sämtlicher Schlamm aus den Reaktoren entfernt. Um ein möglichst breites Artenspektrum im Animpfeschlamm für das Neuaufstarten des MBR zu erhalten, wurde Belebtschlamm aus der Faulwasserbehandlungsanlage der Kläranlage Bülach (Zürich, 1m<sup>3</sup>) bzw. aus der Versuchskläranlage der Eawag (200l) verwendet. Hintergrund dieses Vorgehens ist die unterschiedliche Affinität der verschiedenen Mikroorganismen zum Substrat. So haben bestimmte Ammoniumoxidierer bevorzugte Konzentrationsbereiche in denen sie optimal ihren Stoffwechsel betreiben können. Da in der Kläranlage auf Hohtälli mit sehr viel höheren Ammoniumkonzentrationen zu rechnen ist, als im herkömmlichen kommunalen Bereich, wurde der Faulwasserbehandlungsschlamm gewählt.

#### /// Leistungssteigerung und Aktivitätsmessung der Biomasse

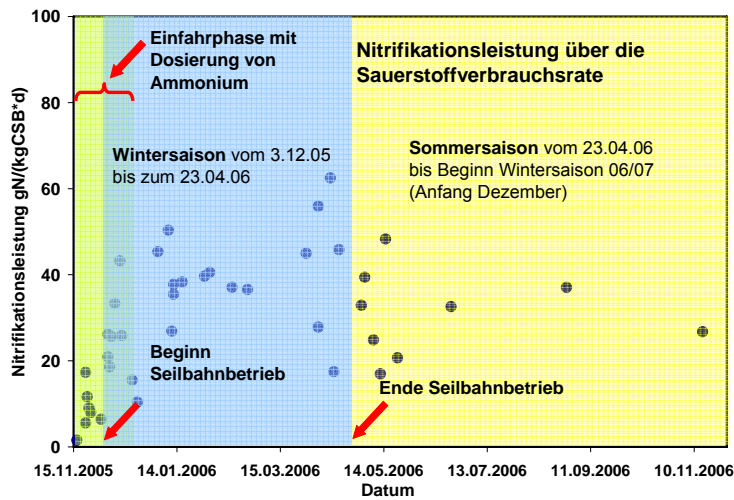
Zentrale Prozesse der biologischen Behandlung des Toilettenabwassers ist die Nitrifikation und Denitrifikation. Um die Nitrifikationsleistung des Belebtschlammes zu bestimmen, wurden gezielte Zehrungsversuche (Batchversuche) zum spezifischen Sauerstoffverbrauch des Belebtschlammes durchgeführt. Das Monitoring der spezifischen Nitrifikationsleistung des Schlammes wurde in zeitlichen Abständen während der gesamten Wintersaison und auch mit Schlamm des Sommerbetriebs der Anlage durchgeführt. Die spezifische Denitrifikationsleistung wurde ebenfalls in Abständen bestimmt.

Um die Aktivität der Biomasse zu steigern und sie entsprechend auf die kommende Belastung nach Öffnung der Seilbahn vorzubereiten, wurde der Schlamm mit künstlichen Substratlösungen „angefüttert“. Hierzu dienten Substratlösungen auf Basis von NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> und NaNH<sub>4</sub>CO<sub>3</sub> bzw. Zuckerlösungen für die Denitrifikation.

Die in Abbildung 7 dargestellten spezifischen Nitrifikationsleistungen wurde über die Sauerstoffverbrauchsrate bestimmt. Berücksichtigung fand hierbei der Rückgang der Aktivität der Nitritoxidieren im System, daher wenn nur ein Teil des Ammoniums bis zum Nitrat oxidiert wird, benötigt dies stöchiometrisch weniger Sauerstoff. Zudem wurde die Inkorporation von Stickstoff beim Biomasseaufbau berücksichtigt. In der Phase in der Ammonium zu 80% vollständig nitrifiziert wird (20% nur bis zum Nitrit), wurde ein spezifischer Bedarf von 4.0 gO<sub>2</sub>/gN angesetzt (Mischquotient für Gesamtprozess von voller und Teil-Nitrifikation). In der Phase in der ein Verlust der Nitritoxidation festgestellt wurde, wurde der Bedarf auf 3.7 gO<sub>2</sub>/gN herab-



gesetzt (Produkte  $\text{NO}_2\text{-N}$  u.  $\text{NO}_3\text{-N}$  entsprechen jeweils nahezu 50%), im weiteren Verlauf dann auf  $3.4 \text{ gO}_2/\text{gN}$ , in der nur noch rd. 20% des zufließenden Ammoniums zu Nitrat oxidiert wurde.



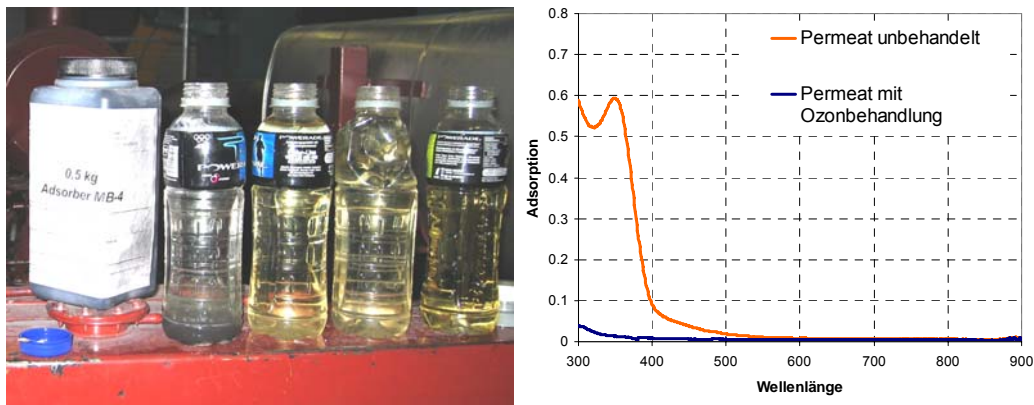
**Abbildung 7** Nitrifikationsleistung des MBR-Schlammes seit Inbetriebnahme 11/2005

In der Einfahrphase konnte durch die Substratzugaben die spezifische Nitrifikationsleistung linear gesteigert werden. Ab Ende Dezember wurde eine mittlere Leistung von etwa  $50 \text{ gN}/(\text{kg CSB} \cdot \text{d})$  erreicht und während der Wintersaison gehalten. Nach Abfall der Belastung der Anlage nach Schliessung der Seilbahn für Touristen verringerte sich die spezifische Leistung nur langsam. Durch einen speziellen Sommerbetrieb der Anlage (vgl. nachfolgende Empfehlung) wurde der belebte Schlamm jedoch derart gepflegt, dass ein möglichst geringer Zerfall und der damit verbundener Leistungsrückgang erzielt werden konnte. Aktivitätstest von Ende August 06 zeigen eine Aktivität von knapp  $40 \text{ gN}/(\text{kg CSB} \cdot \text{d})$ . Es ist geplant Mitte November (ca. 3 Wochen vor Betriebsbeginn der Wintersaison 2006/07) einen weiteren Aktivitätstest durchzuführen, um dann auf Grundlage der vorhandenen Nitrifikationsleistung Aussagen über eine Anfahrprozedur machen zu können. Sollte die Leistung dann noch bei rd. 25 bis  $30 \text{ gN}/(\text{kg CSB} \cdot \text{d})$  liegen, wird ein aufwendigeres Anfahren der Anlage oder gar Animpfen gegebenenfalls nicht notwendig sein.

**Empfehlung zum Sommerbetrieb:** Um eine möglichst hohe Nitrifikationsleistung des Belebtschlammes bis zum Winterbetrieb über den Sommer hinweg aufrecht zu erhalten, sollte der gesamte Schlamm der Anlage im MBR gespeichert werden. Kurze Belüftungsintervalle des Reaktors im Sommerbetrieb verhindern ein Faulen des Schlammes. Gleichzeitig wird das durch Biomassenzersetzung freigesetzte Ammonium von den verbliebenen autotrophen Organismen veratmet. Eine Dauerbelüftung des Schlammes ist unbedingt zu vermeiden, da der Zerfall der Nitrifikanten unter aeroben Bedingungen vergleichsweise schneller ist, als bei sehr tiefen Sauerstoffkonzentrationen oder anaeroben Verhältnissen. Ein Belüftungspausenintervall von 4h und eine Belüftungsdauer von 5 Min haben sich bisher als günstig für die Biomassenerhaltung ohne Substratzugaben erwiesen.

## 4.2 Entfärbung des gereinigten Abwassers

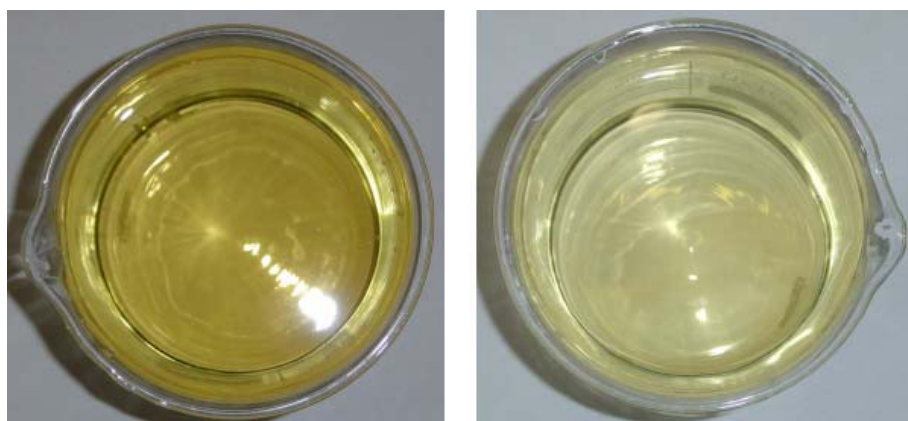
Durch die Wiederverwendung des gereinigten Abwassers wird im zirkulierenden Wasser der gelbe Farbstoff des Urins (Abbaustoff des Hämoglobins) akkumuliert, zudem entstehen auch durch biologische Abbauprozesse Verfärbungen im Permeat. Gelbes Spülwasser, welches in der Toilette steht, verleitet den Benutzer zum mehrfachen Spülen der Toilette noch vor dem eigentlichen Gebrauch. Dies führt zur unnötigen hydraulischen Belastung der Anlage. Zur Elimination der Farbstoffe im gereinigten Abwasser wurden seitens der Bergbahnen bereits Versuche mit Aktivkohle im Vorfeld des Projektes durchgeführt (vgl. **Abbildung 8**).



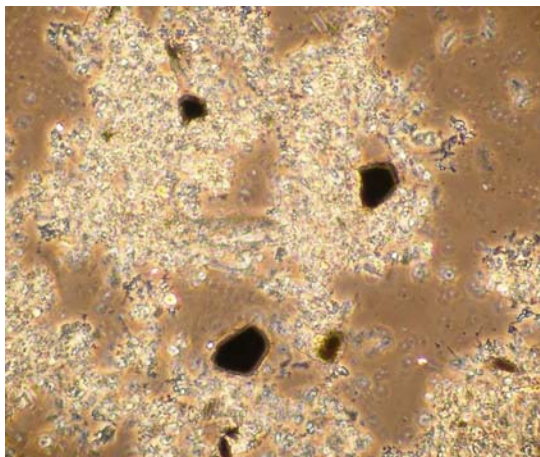
**Abbildung 8** Entfärbungsversuche mit unterschiedlichen Aktivkohledosierungen (Versuche Zermatt Bergbahnen) und mittels Ozonbehandlung (Versuche Eawag)

Neben diesen Versuchen wurde seitens der Eawag der mögliche Einsatz von Ozon zur Entfärbung geprüft, welches sich grundsätzlich als effizientes Mittel eignet (**Abbildung 8**). Der Einsatz von Ozon wurde jedoch nicht weiterverfolgt, da aufgrund der Materialeigenschaften der Behälter und aus sicherheitstechnischen Gründen die Methode nur wenig vorteilhaft ist.

Beim Einsatz von Pulveraktivkohle (PAK, dosiert in den MBR) konnte eine merkliche Verbesserung der Farbqualität des Permeates festgestellt werden (**Abbildung 9**). Mikroskopische Bilder des Belebtschlammes zeigen die PAK-Partikel im Belebtschlamm (**Abbildung 10**).



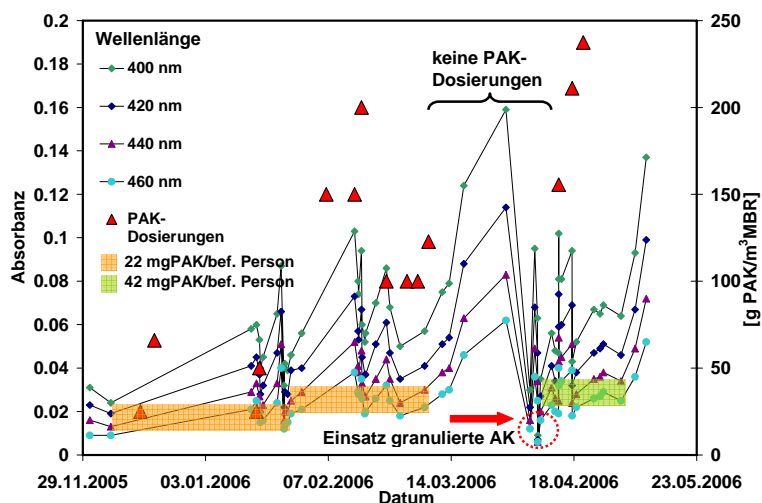
**Abbildung 9** Vergleich der Verfärbung. links 14.2. (ohne Zugabe der Aktivkohle), rechts 17.2. (nach der Zugabe von Aktivkohle).



**Abbildung 10** Mikroskopisches Bild des MBR-Belebtschlammes von Hohtalli

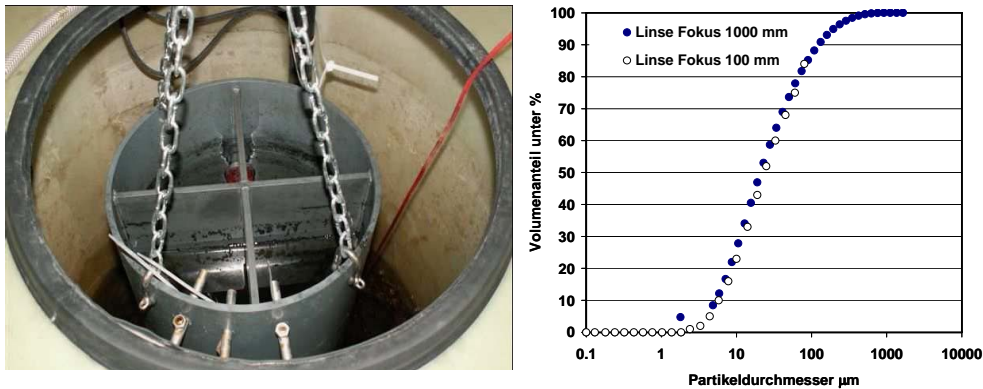
Um die Effizienz und vor allem die notwendigen Dosiermengen bestimmen zu können, wurde der Verlauf der Verfärbung durch Aufnahme der Absorbanz des Permeates aufgezeichnet.

**Abbildung 11** zeigt den Verlauf der Absorbanz des Permeates von vier verschiedenen Wellenlängen und die Aktivkohledosierungen im Verlauf des Projektzeitraumes. Deutlich ist die Abnahme der Absorbanz nach Dosierung der PAK erkennbar. Insgesamt wurde eine PAK-Menge von rd. 5.5 kg in der Wintersaison gesamthaft verbraucht, wobei hier zu berücksichtigen ist, dass im Zeitraum von rd. 3 Wochen (Mitte März bis Anfang April) keine PAK-Dosierung vorgenommen wurde, da zunächst ein Zusammenhang von Permeabilitätsverlust der Membranen und Pulveraktivkohle-Dosierung vermutet werden musste.



**Abbildung 11** Verlauf der Verfärbung bzw. Absorbanz des Permeates und PAK-Dosierungen in der Wintersaison 2005/06.

Um eine vermutete negative Auswirkung der PAK-Dosierung auf die Permeabilität auszuschliessen, wurde eine nachgeschaltete Behandlung eingerichtet. Ein Behälter, gefüllt mit granulierter Aktivkohle, (**Abbildung 12**) wurde in den Permeatspeicher eingehängt. Zufliessendes Permeat passierte daher zuerst die granulierte Aktivkohle und wurde so nach Verlassen des MBR vor der Speicherung entfärbt.



**Abbildung 12** Nachgeschalteter Behälter für die Behandlung mit granulierter Aktivkohle (eingehängt in Filtratspeicherbehälter, links) und Partikelgrößenverteilung von PAK (rechts)

Diese Behandlung ist bezüglich der Entfärbung als sehr effektiv zu beschreiben (vgl. **Abbildung 11**, sehr geringe Absorbanz des Permeates um den 10.04.06, roter Kreis), jedoch aufgrund der hohen Kosten für die Aktivkohle nicht praktikabel. Die granulierten Aktivkohle weist im Vergleich zur PAK eine geringere äussere Oberfläche auf respektive können vermutlich die Farbstoffmoleküle aufgrund ihrer Grösse nicht in das Aktivkohlekorn eindringen und dort an die Oberflächen adsorbieren. Somit ist die granulierten Aktivkohle schneller belegt respektive aufgebraucht und müsste daher in kürzeren zeitlichen Intervallen ausgetauscht werden, was einen vermehrten Arbeitsaufwand (Personalaufwand) generieren würde. Zudem entstehen im Vergleich zum Einsatz von PAK mehr zu entsorgende Reststoffe.

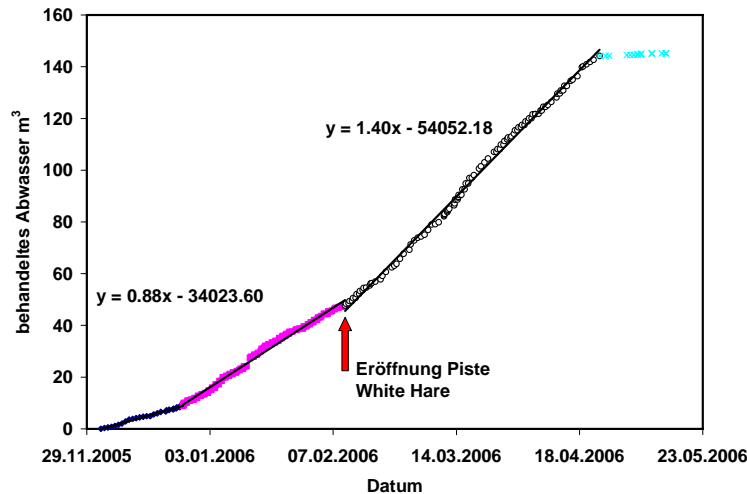
Untersuchungen zur Partikelgrößenverteilung der PAK ergaben, dass der vermutete Zusammenhang zwischen verringerter Permeabilität und PAK-Dosierung nicht hergestellt werden kann, da die kleinsten PAK-Partikel grösser 1 µm sind und so die Membranporen nicht verstopfen können (Porengrösse der Membran 35 nm).

Aufgrund der gemachten Erfahrungen zur PAK-Dosierung kann festgehalten werden, dass wenn im Abstand von 2 bis 3 Tagen (in Abhängigkeit der Besucherzahl) rd. 100g PAK pro m<sup>3</sup> MBR-Volumen dosiert wird, ein gewünschtes tiefes Verfärbungsniveau mit einer Absorbanz von 0.02 bis 0.04 erreicht werden kann.

**Empfehlung:** Bezogen auf die behandelte Abwassermenge sind 50 bis 100 gPAK/m<sup>3</sup> gereinigtes Abwasser oder bezogen auf die Anzahl beförderter Personen 20 bis 40 mgPAK/beförderter Person zu dosieren. Die bisherigen Dosierungen wurden manuell durchgeführt, eine automatisierte und lastabhängige Dosierung würde ein tiefes Verfärbungsniveau des Toilettenspülwassers weitestgehend gewährleisten. Dennoch sollte in zeitlichen Abständen eine optische Kontrolle, wenn auch subjektiv, des Spülwassers in der Toilettenschüssel vorgenommen werden. Bei Bedarf kann dann zusätzlich zur frachtabhängigen Dosierung PAK zudosiert werden. Zur Dosierung der PAK sind noch Abklärungen bezüglich Automatisierung und Produkt zu machen. Eventuell kann die PAK in wässriger Lösung von einer zentralen Anlage, die bereits PAK zur Entfärbung einsetzt (Textilindustrie) eingekauft werden, da das Einbringen der trockenen, sehr feinen PAK verbunden mit starker Staubbildung war und das Benässen bzw. Einmischen der PAK in den MBR schwierig ist. Wenn ein geeignetes Produkt gefunden ist, wird die Eawag den Feuchtegehalt der PAK bestimmen und Angaben zur Dosiermenge machen.

### 4.3 Wasserverbrauch und Aufsalzung des Systems

Der Seilbahnbetrieb beeinflusst wesentlich den täglichen Wasserverbrauch bzw. die zu behandelnde Abwassermenge. Der Seilbahnbetrieb selbst ist wiederum stark von den örtlichen Witterungsverhältnissen abhängig. Nach Öffnung der Piste White Hare (Seilbahn Hohtälli - Gant, Riffelalp) wurden erheblich mehr Personen zur Bergstation transportiert. Der tägliche Wasserverbrauch stieg hiermit verbunden von durchschnittlich rd. 0.9 auf 1.4m<sup>3</sup> pro Tag (**Abbildung 13**). Bei Spitzenbelastungen (z.Bsp. Ostern) können bis zu 2m<sup>3</sup>/d Spülwasser benötigt werden.



**Abbildung 13** Wasserverbrauch bzw. behandeltes Abwasser auf der Bergstation

Um die zu behandelnde Abwassermenge zu minimieren wurden die Spülkästen der 4 Toiletten ausgelitert und auf ein Spülwasservolumen von rd. 6 l auf 4 l/Spülung reduziert. Hierdurch wird das zu behandelnde Abwasser konzentrierter. Wie auch bei der Verfärbung kommt es durch die Wiederverwendung des behandelten Abwassers zu einer Aufkonzentrierung der gelösten Salze. Verstärkt wird dieser Prozess durch die Verdunstung eines Teils des Abwassers durch die Belüftung des MBR (rd. 5l/d).

**Tabelle 1** Zusammensetzung von Urin (verschiedene Quellen) aus Udert (2003)

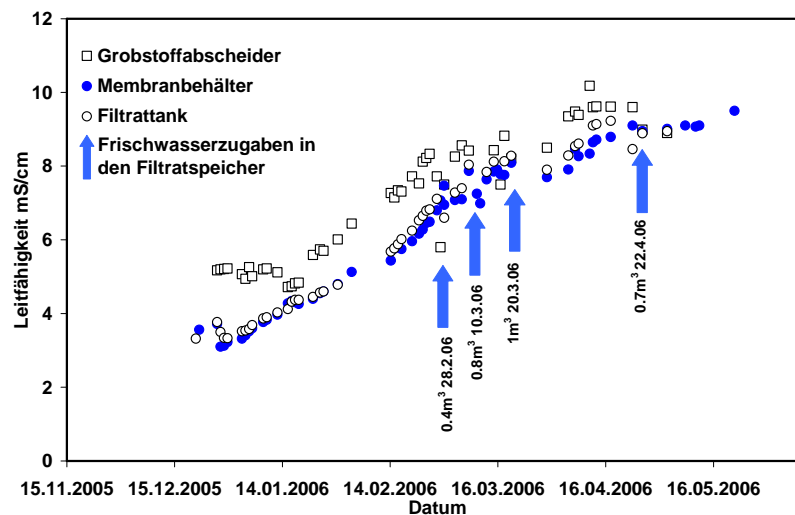
	Hesse and Bach (1982)		Naudascher (2001)		Hellström and Kärrman (1996)		Udert et al. (2003c)
	Average [mmol/p/d]	SD [mmol/p/d]	Average [mmol/p/d]	SD [mmol/p/d]	Average [mmol/p/d]	SD [mmol/p/d]	
Total nitrogen	-	-	770	150	930	210	-
Total ammonia	-	-	41	14	-	-	34
Urea	-	-	300	60	-	-	390
Phosphorus	30	4	30	7	32	13	23
Calcium	5.0	2.1	-	-	-	-	5.2
Magnesium	5.0	1.7	-	-	-	-	6.2
Sodium	170	50	-	-	-	-	200
Potassium	75	38	66	15	-	-	72
Bicarbonate	-	-	-	-	-	-	<0.5
Total sulphur	-	-	-	-	-	-	-
Inorganic sulphate	19	6	-	-	-	-	18
Chloride	170	50	160	-	-	-	180
Citric acid	2.6	1.4	-	-	-	-	-
Oxalic acid	0.35	0.2	-	-	-	-	-
pH [-]	6.1	0.2	-	-	-	-	6.0
TOC	-	-	-	-	-	-	-
COD [gO <sub>2</sub> /p/d]	-	-	13	5	-	-	12
BOD <sub>5</sub> [gO <sub>2</sub> /p/d]	-	-	6.1	2.2	-	-	-
TS [g/p/d]	-	-	-	-	-	-	-
Volume [l]	1.3	0.5	1.6	0.60	1.5	0.5	-



Urin beinhaltet neben den Nährsalzen Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor eine Reihe anderer Salze, welche der menschliche Körper ausscheidet. gibt einen Überblick über die wesentlichen Salze im Urin. Auch über Fäkalien kommt es zu einem Eintrag von Salzen in das Abwasser.

Um den Verlauf und die Höhe der Aufsalzung des Permeates zu beobachten, wurde bei den Kontrollmessungen die Leitfähigkeit des Abwasser bzw. des Permeates gemessen.

Abbildung 14 zeigt den nahezu linearen Anstieg der Leitfähigkeit im Permeat. Aufgrund von Betriebsstörungen wurde in der Saison 4-mal Frischwasser in den Filtrattank zugegeben, um an diesen Tagen genügend Spülwasser bereitzustellen.



**Abbildung 14** Saisonverlauf der Leitfähigkeit in den Reaktoren

Eine durchgeführte Bestimmung der Ionenzusammensetzung des Permeates entsprach mit der Rückrechnung über die spezifische Leitfähigkeit der Ionen und Salze in etwa die gemessene Leitfähigkeit.

Aufgrund der Nährstoffelimination, Ausfällungen und des Biomassenzuwachses (Überschussschlammabzug) kann ein Teil der Salze entfernt werden. Dennoch wurde gegen Ende der Wintersaison eine Leitfähigkeit von knapp 10 mS/cm gemessen, was etwa der Hälfte derjenigen von reinem Urin entspricht. Im gereinigten Abwasser verbleiben die einwertigen Ionen.

Der Einfluss der hohen Salzkonzentration auf die biologischen Prozesse kann nicht abschliessend beurteilt werden. Gegebenenfalls hatte die hohe Leitfähigkeit im Belebtschlamm eine hemmende oder toxische Wirkung auf die Nitritoxidierer, da gegen Ende der Betriebsaison nur noch etwa 20% der zufließenden Ammoniumfracht zu Nitrat oxidiert wurde. Dies war jedoch für das Gesamtsystem von Vorteil. Bei der Denitrifikation über Nitrit wird weniger organischer Kohlenstoff als über Nitrat verbraucht, so dass stöchiometrisch betrachtet nur noch 1.71 statt 2.86gCSB pro gNitrit-N benötigt werden. Zudem wird für die Nitrifikation weniger Alkalinität verbraucht, da weniger Protonen abgegeben werden. Beide Stoffe sind für die genannten Prozesse im System limitierend.

Grundsätzlich hat sich die Biologie an die steigenden Salzgehalte adaptiert. Es ist zu erwarten, dass nach genügender Adaption auch bei höheren Salzgehalten die Biologie zufriedenstellend arbeitet, da im Meerwasser (Leitfähigkeit von rd. 40 mS/cm) alle genannten Prozesse

se ebenfalls stattfinden. Dennoch ist in diesem Zusammenhang zu empfehlen, dass immer ein Teil des Abwassers aus Frischwasser bestehen sollte. Dies begründet sich vor allem darin, dass es bei höheren Salzgehalten zu Ausfällungen kommen kann, welche für den Betrieb nachteilig sind. Rohrleitungen, Pumpen und auch andere Aggregate wie die Membranen könnten durch stärkere Ausfällungen in Mitleidenschaft gezogen werden.

Eine am Abwasseraufkommen anteilig geringe Frischwasserzufuhr könnte über die Handwaschbecken realisiert werden, welche bis dato ebenfalls mit Permeat betrieben wurden. Eine andere Möglichkeit wäre der Anschluss der Dachentwässerung, wobei hier der Zufluss nicht vergleichmässig über die Betriebszeit gleichmässig verteilt erfolgen würde.

**Empfehlung zur Aufsatzung:** Um eine starke Aufsatzung des Belebtschlammes und die damit verbundenen möglichen Probleme (Ausfällungen) zu vermeiden, empfehlen wir im Zulauf der Anlage immer einen Teil Frischwasser einzuleiten. Wie bereits aufgezeigt, ist auch aus hygienischen Gründen das Handwaschbecken mit Frischwasser zu betreiben. Somit gelangt immer ein sehr kleiner Teil Frischwasser in die Kläranlage und die Aufsatzung erfolgt langsamer und erreicht ein tieferes Niveau. Die Handwaschbecken bzw. Armaturen sollten mit einem Druckknopf oder Lichtschranke versehen werden, da so der Zulauf bzw. Verbrauch an Frischwasser minimiert wird. Vor Beginn einer neuen Wintersaison sollte der im MBR im Sommer gespeicherte Schlamm auf GR und MBR etwa gleich verteilt werden. MBR und beide Filtratspeicher sollten einmalig mit Frischwasser aufgefüllt werden, so dass das Gesamtsystem mit einer geringen Ausgangsleitfähigkeit aufstartet.

Im Fall der Kläranlage Hohtälli ist vom Gebrauch des Dachwassers abzusehen, da die Dächer mit Kupferblech verkleidet bzw. gedeckt sind. Erhöhte Kupferverbindungen schädigen den Stoffwechsel und haben toxische Wirkung auf Organismen.

#### 4.4 Nährstoffelimination

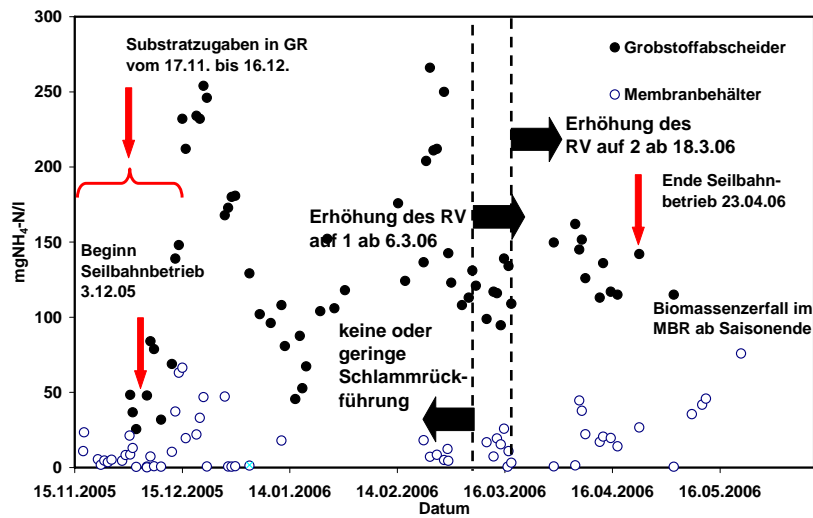
Ziel der Abwasserreinigung auf Hohtälli ist neben der Bereitstellung von Spülwasser für den Betrieb der Toilettenanlage eine weitestgehende Elimination der Nährstoffe des Abwassers. Da ein Teil des Abwassers im Umfeld der Bergstation versickert, soll eine möglichst geringe Beeinträchtigung erreicht werden. Gemäss der durchgeführten Wasserbilanz sind dies rd. 14l/d die versickern (bestimmt aus Eintrag und Verdunstung), wobei in der Realität zusätzlich noch über den Überschussschlamm Wasser aus dem System ausgetragen wurde. In der ersten Wintersaison 2004/05 war die biologische Reinigungsleistung der Anlage sehr gering. Es konnte nur ein kleiner Teil der Stickstofffracht nitrifiziert werden. Eine Stickstoffelimination durch Denitrifikation konnte nicht erreicht werden. Es kam zu Substratlimitierungen bzw. zur Hemmung der Biologie bzw. Nitrifikation durch einen zu tiefen pH-Wert im System (Versäuerung des Belebtschlammes).

##### /// Nitrifikation und Stickstoffelimination

Während des gesamten Betriebszeitraumes in der Saison 2005/06 konnten die Ammoniumzulaufmengen vollständig nitrifiziert werden (vgl. **Abbildung 15**). Im Mittel beträgt die Konzentration im GR bzw. die Zulaufkonzentration zum MBR rd. 130 mgNH<sub>4</sub>-N/l. Im MBR finden sich am Morgen rd. 20 mg NH<sub>4</sub>-N/l, wobei es jedoch nicht zu einer Akkumulation von Ammonium durch die Wiederverwendung im System kommt. Die Probenahme erfolgte in den Morgenstunden, so dass das gefundene Ammonium zu einem Teil aus Biomassenerfall und

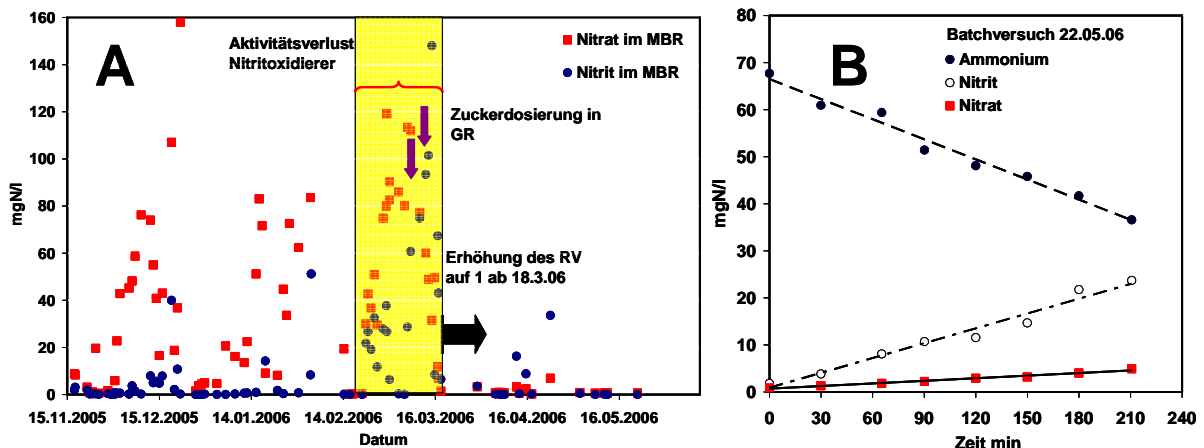


weiterer Ammonifikation von Harnstoff herrührt. Der Ablauf des MBR bzw. der Anlage selbst (Überlauf der Anlage rd. 14l/d) hat nur sehr geringe Ammoniumkonzentrationen (nahe 0 mg/l), andernfalls hätte es zu einer Akkumulation von Ammonium kommen müssen, wenn stetig im Permeat 20mg NH<sub>4</sub>-N/l verblieben wären.



**Abbildung 15** Saisonverlauf der Ammoniumkonzentration in den Reaktoren

Aktivitätstests mittels Batchreaktoren im Betriebszeitraum dokumentieren die Leistung der Nitrifikation (Abschnitt 4.1, Abbildung 7). Wie bereits aufgezeigt, veränderte sich im Betriebszeitraum die Aktivität der Nitritoxidierer. Abbildung 16A zeigt die Phase, in der es vermutlich zu einer Hemmung der Nitritoxidierer kam. Sichtbar wird dieser Aktivitätsverlust aufgrund der zeitgleichen Substratlimitierung der Denitrifikation, die im Zeitraum zu einer deutlichen Erhöhung von Nitrat und Nitrit im MBR führten. Nitrit wird nicht weiter zu Nitrat oxidiert. Anschließende Zuckerdosierungen in den GR verhinderten eine Akkumulation von Nitrit im System bzw. ermöglichen die vollständige Denitrifikation und senkten die sehr hohen Nitritkonzentrationen im MBR.

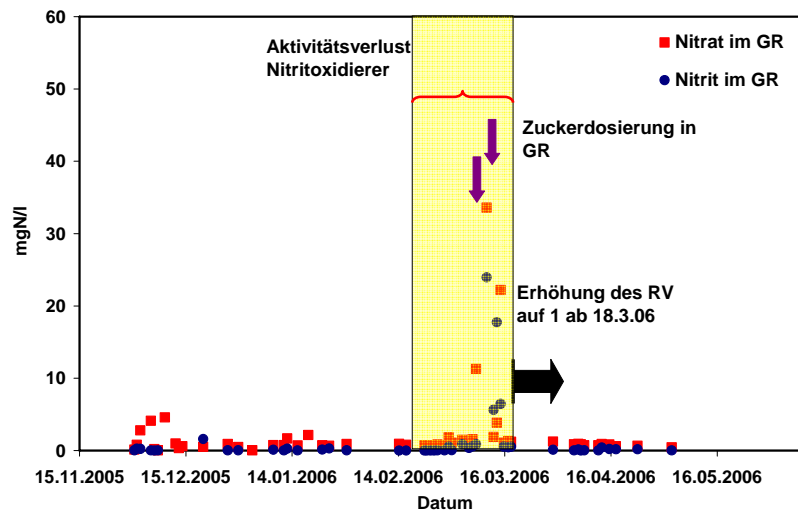


**Abbildung 16A** Nitrit und Nitrat im MBR bzw. **16B** Nitrit/Nitratbildung im Batchversuch vom 22.05.06  
Dies zeigt sich auch deutlich bei den durchgeführten Batchversuchen (Beispiel Batchversuch vom 22.05.06, vgl. Abbildung 16B). Es werden nur noch 20% des Ammoniums vollständig bis zum Nitrat nitrifiziert.

Ohne effiziente Denitrifikation würde es zu einer Akkumulation von Nitrit und Nitrat kommen, welches die Problematik der Aufsatzung verstärken würde. Eine Versäuerung des Be-

lechtschlammes wäre zudem die Folge, da in der Denitrifikation durch Protonenaufnahme die Alkalinität und damit der pH-Wert wieder angehoben wird, welcher vorher in der Nitrifikation durch Säureproduktion vermindert wurde. Eine Versäuerung (pH-Wert unter 6) des Belebtschlammes führt zu einer Inaktivierung der Nitrifikanten.

Eine 100%-tige Stickstoffelimination bzw. Denitrifikation konnte im Betriebszeitraum erreicht werden. Zu einem überwiegenden Teil erfolgte diese in den unbelüfteten Phasen (30min) im MBR und zu einem geringeren Teil im GR (Abbildung 17).



**Abbildung 17** Nitrit und Nitrat im Grobstoffabscheider

Um die Denitrifikation auch im GR zu ermöglichen und um die Hydrolyse zu begünstigen, wurde das Rücklaufschlammverhältnis (RV) auf 1 bzw. später auf 2 erhöht. Neben diesen Effekten hat die erhöhte Rückführung Einfluss auf das Einwachsen von phosphorakkumulierenden Organismen (PAO's, vgl. auch nächster Abschnitt).

**Empfehlung Betrieb MBR:** Die Abfolge von belüfteten und unbelüfteten Phasen im MBR sind notwendig, um eine effiziente Nitrifikation und Denitrifikation zu gewährleisten. Eine hinreichende Denitrifikation gewährleistet zudem, dass der pH-Wert und die Alkalinität nicht zu stark abfallen. Eine längere durchgehende Belüftung des Reaktors ist zu vermeiden, da sonst der Membranreaktor versäuert. Ein pH-Wert zwischen etwa 7 (Ende belüftete Phase) und 7.5 (Ende unbelüftete Phase) gewährleistet gute Randbedingungen für die Stickstoffelimination. Akkumulieren Ammonium, Nitrit oder Nitrat im MBR, deutet dies auf eine Störung der genannten biologischen Prozesse hin und es sind entsprechende Massnahmen zutreffen (siehe Handbuch). Die Rückführung des Schlammes sollte vergleichmässig erfolgen und lastabhängig verteilt über den Tag. Hierdurch wird ein besserer Kontakt des frischen Belebtschlammes mit Abwasser ermöglicht.

Geregelt ist die Rückführung über die Anzahl Zyklen (daher nahezu frachtabhängig). Die Menge der Schlammrückführung wird über die Laufzeit der Rücklaufschlammpumpe definiert. Insgesamt begünstigt und stabilisiert ein erhöhtes RV den Gesamtprozess der Reinigung. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Simulationen (Abschnitt 0).

## Phosphorelimination

Neben Stickstoff spielt Phosphor eine weitere bedeutende Rolle als limitierender Nährstoff in der Natur und wird daher sowohl durch chemische als auch durch biologische Verfahren aus dem Abwasser entfernt.

Wie zeigt, beinhaltet Urin eine hohe Menge an gelösten Phosphor und ist daher Hauptentragspfad im kommunalen Abwasser.

Da Phosphor nicht aus dem Abwasser eliminiert werden kann wie zum Bsp. Stickstoff durch Denitrifikation, sollte sich Phosphor seit Beginn der Inbetriebnahme im Permeat bzw. in der Anlage akkumulieren. Ein kleiner Austrag an Phosphor aus dem System erfolgt nur durch Biomasseabzug (Überschussschlammabzug), da ein Teil des gelösten Phosphors in der Biomasse inkorporiert wird. Ein Weiterer jedoch geringerer Teil kann über den Überlauf zur Versickerung die Anlage verlassen.

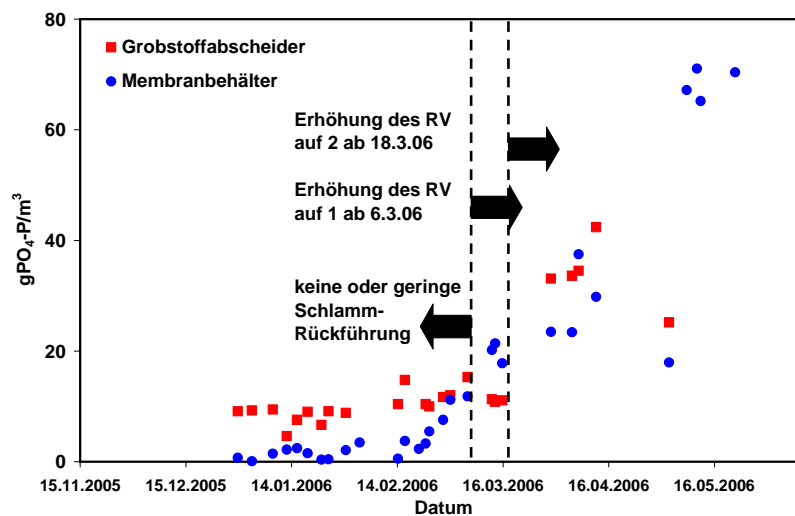


Abbildung 18 Akkumulierter gelöster Phosphor in GR und MBR

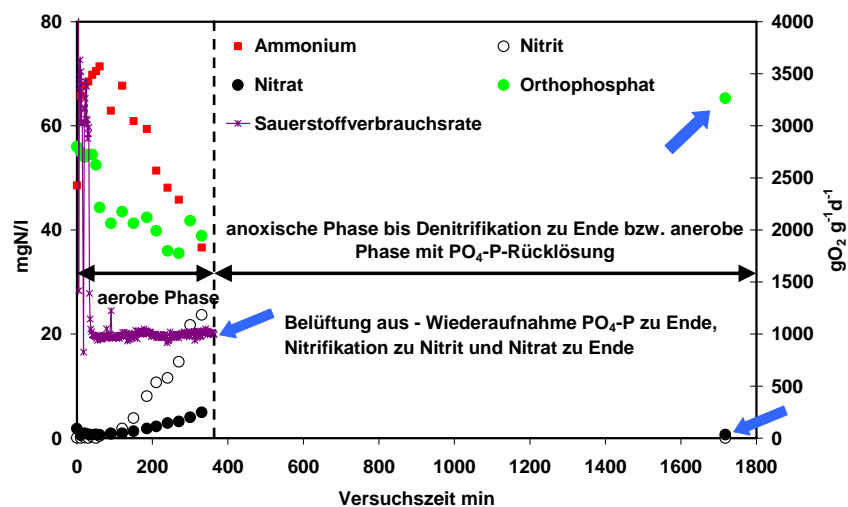
Abbildung 18 zeigt die Konzentrationen von gelöstem Phosphor im MBR und GR. Im GR stellt sich vor Inbetriebnahme eines erhöhten Schlammrücklaufes eine Phosphorkonzentration von rd. 8 mgPO<sub>4</sub>-P /l ein. Diese ist relativ stabil trotz stetigem Zulauf von Urin. Zu einer Erhöhung des gelösten Phosphors im GR kommt es erst ab einem erhöhten Rücklauf aus dem MBR (ab Mitte April), in dem bereits vorher eine Akkumulation erkennbar wird (ab Ende Februar). Am Ende der Saison beträgt der Phosphorgehalt im MBR rd. 75 mg/l.

Ursächlich für eine verzögerte Akkumulation scheinen Fällungsreaktionen im MBR zu sein. Eventuell hatte der Impfschlamm grössere Mengen Eisenverbindungen, welche den gelösten Phosphor partikulär gebunden haben. Diese Ausfällungen wurden jedoch nicht im Belebtschlamm wieder gefunden, da Untersuchungen des Phosphorgehaltes im Schlamm keine wesentlich erhöhten Werte ergaben ( $iP_{TS}$  zwischen 0.02 bis 0.023 gP/kgTS). Eventuell sind diese Ausfällungen an Reaktorwandungen und anderen Oberflächen in den Reaktoren angehaftet. Abschliessend konnte nicht geklärt werden, wo der Phosphor in den ersten Betriebsmonaten gebunden werden konnte.

Wie bereits aufgezeigt wird nur ein kleinerer Teil Phosphor in der Biomasse gebunden. Werden jedoch bestimmte verfahrenstechnische Rahmenbedingungen eingestellt, kann aufgrund der Anlagenkonfiguration der Anlage Hohtälli eine erhöhte biologische Phosphoreinlagerung in die Biomasse erreicht werden (erhöhte biologische Phosphorelimination).

Da eine weitestgehende Stickstoffelimination im MBR erreicht wurde durch ein erhöhtes Rücklaufschlammverhältnis in den letzten 6 Betriebswochen, konnte der GR als Anaerobreaktor betrieben werden. Ein vorgeschalteter Anaerobreaktor erlaubt die Akkumulation der zur erhöhten Phosphorakkumulation befähigten Mikroorganismen (PAO's).

Da diese Organismen die erhöhte P-Aufnahme im aeroben Teil der Anlage durchführen und der Überschussschlamm aus diesem Anlagenteil entnommen wird, erfolgt somit auch ein vergleichsweise erhöhter Austrag von Phosphor aus dem System. Aktivitätsmessungen mittels Batchtests mit Belebtschlamm aus der Zeit gegen Ende der Betriebszeit und auch Simulationen zeigen die Fähigkeit des Systems bzw. das Vorhandensein einer BioP-Aktivität (erhöhte biologische Phosphorelimination (Abbildung 19)).



**Abbildung 19** Batch-Versuch vom 22.05.06 zur Bestimmung der Nitrifikationsleistung und der BioP-Aktivität nach Ende der Wintersaison

Kann die BioP-Aktivität in der nächsten Saison von Beginn an durch entsprechende Betriebseinstellungen erreicht werden, wird es zu einer verringerten Akkumulation von gelöstem Phosphor kommen. Durch regelmässige Überschussschlammabzüge aus dem MBR in der aeroben Phase wird somit ein grösserer Anteil aus dem System in gebundener Form entfernt. In einer Gesamtbetrachtung können dann rd. 80% des Phosphors aus dem gereinigten Abwasser durch biologische Inkorporation gebunden bzw. entfernt werden.

### /// Kohlenstoffelimination bzw. Überschussschlammproduktion

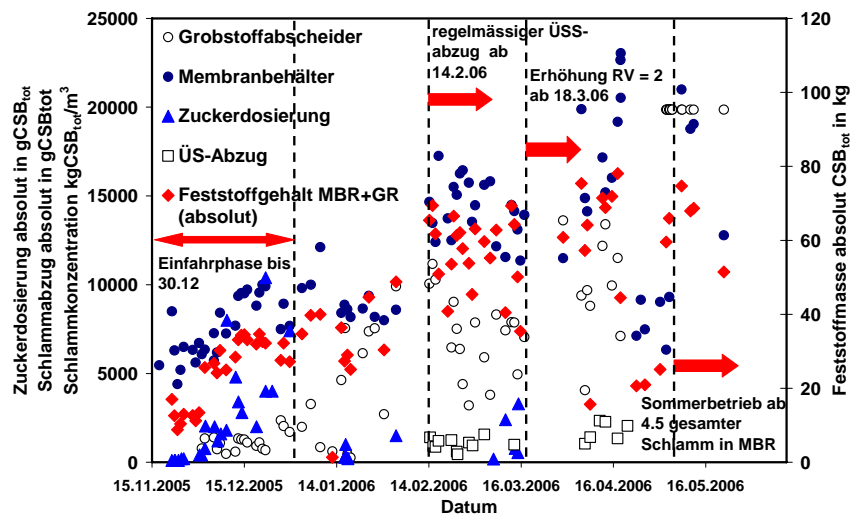
Bei der Kohlenstoffelimination veratmen Mikroorganismen unter Sauerstoffverbrauch organische Bestandteile des Abwassers zu Kohlendioxid oder nutzen diese unter sauerstofffreien (anoxischen) Bedingungen als Kohlenstoffquelle für die Denitrifikation. Etwa 35% (yield = 0.35) werden direkt zum Biomassenaufbau benötigt.

Anfänglich wurde spekuliert, dass es ggf. eine Limitierung bezüglich leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen für die Denitrifikation im Zulauf geben würde. Zuckerdosierungen wurden daher gerade in der Einfahrphase durchgeführt. In der Summe waren dies 17.2 kg.

Im Verlauf des Betriebes stellte sich heraus, dass bei entsprechender Betriebsführung genügend leicht abbaubare Kohlenstoffverbindungen zur Verfügung gestellt werden können. Durch eine gute Hydrolyse der Abwasserinhaltsstoffe (Fäkalien, Toilettenpapier) kann der Feststoffanfall gering gehalten werden bzw. genügend C-Verbindungen in Lösung gebracht werden.

Die Veränderungen in der Zusammensetzung der Nitrifikantenpopulation resultierte wie bereits aufgezeigt zu einer Reduktion der Nitratbildung bzw. der überwiegende Teil wurde nur noch bis zum Nitrit oxidiert. Dies führte zu einem geringeren Kohlenstoffbedarf bei der Entstickung. Stöchiometrisch betrachtet sind für die Elimination von einem kg Nitratstickstoff 2.86 kg leicht abbaubare C-Verbindungen notwendig. Wird jedoch über Nitrit denitrifiziert, kann der Bedarf auf bis zu 1.94 kg gesenkt werden.

**Abbildung 20** zeigt die Konzentration von Feststoff in MBR und GR und die durchgeführten Zuckerdosierungen. Im Verlauf der Saison steigert sich die Konzentration an Feststoffen bzw. von Belebtschlamm durch Biomassenzuwachs. In der Einfahrphase ist der Biomassenzuwachs aufgrund der Zuckerdosierungen vergleichsweise stärker. Ab Mitte Februar wurde kontinuierlich Überschussschlamm abgezogen, so dass sich der Feststoffgehalt im MBR auf etwa 14 bis 16gCSB<sub>tot</sub>/l stabilisiert.



**Abbildung 20** Feststoffgehalt und Zuckerdosierungen im Betriebszeitraum

**Empfehlung Rücklaufschlammverhältnis:** Ein erhöhtes Rücklaufschlammverhältnis von mindestens 1 gewährleistet eine hohe Biomassenkonzentration im GR und ermöglicht eine gute Hydrolyse der organischen Verbindungen. Die Hydrolyse solubilisiert die organischen, partikulären Kohlenstoffverbindungen und macht diese biologisch verfügbar. Hierdurch bedingt ergibt sich eine hinreichende Denitrifikation im MBR, da es zu keiner Kohlenstofflimitation kommt. Ist das Permeat bzw. Filtrat nahezu nitrit- und nitratfrei, gelingt es den GR nahezu anaerob zu betreiben. Phosphorakkumulierende Bakterien können so in das System einwachsen und es kommt zu einer erwünschten, erhöhten biologische Phosphorelimination. Die Rücklaufschlammmenge sollte verteilt in den GR gepumpt werden und nicht auf einmal. Somit ist die Verweilzeit des belebten Schlammes im GR höher respektive die Kontaktzeit des Schlammes mit dem Abwasser höher.

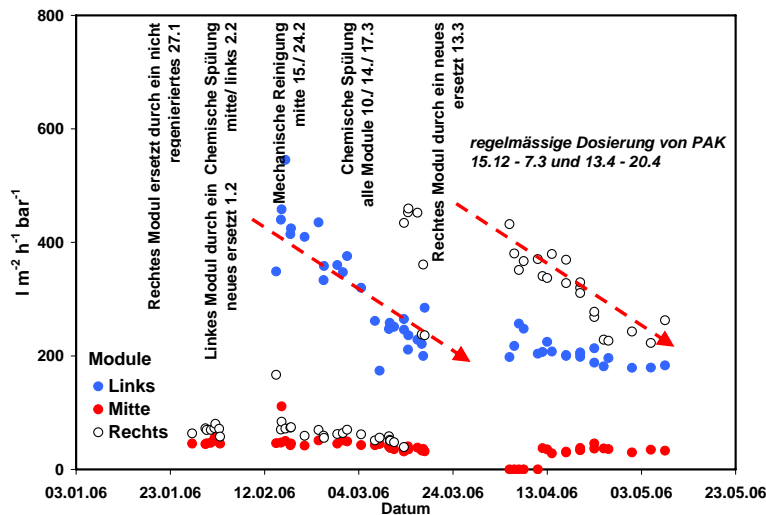
**Empfehlung Überschussschlammabzug:** Ein regelmässiger Überschussschlammabzug vermeidet eine Akkumulation von Biomasse in der Anlage. Angestrebt werden sollte eine Feststoffkonzentration von 8-10 gCSB<sub>tot</sub>/l. In Abhängigkeit der täglichen Besucherzahlen (vgl. Abbildung 23) ergibt sich ein unterschiedlicher Biomassenzuwachs. Wird nach 4500 beförderter Personen ein Schlammentwässerungssack befüllt, sollte sich die gewünschte Feststoffkonzentration im MBR einstellen und stabilisieren (Füllinhalt rd. 150l). Mit dem Überschussschlammabzug wird auch die dosierte PAK mit abgezogen, so dass kein Abzug direkt nach einer PAK-Dosierung stattfinden sollte.

Um das Handling des Überschussschlammabzuges und den Betriebsaufwand zu minimieren, könnte die Anschaffung einer automatisierten, lastabhängigen Überschussschlamm-einrichtung den gesamten Betrieb erleichtern. Automatisierte Anlagen zur statischen Entwässerung von Klärschlamm mittels Entwässerungssäcke sind kommerziell in verschiedenen Grössen und Ausführungen erhältlich.

### 4.5 Leistungsfähigkeit der Membranen

Im Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung ist die Membrantechnologie eine neue, innovative aber auch anspruchsvolle Verfahrenstechnik. Gerade in dezentralen, kleineren Abwasserreinigungsanlagen scheint die Membrantechnologie (MBR) zunehmend an Bedeutung zu gewinnen, wobei gleichzeitig die Weiterentwicklung bezüglich der Leistungsfähigkeit, der Wirtschaftlichkeit, aber auch des Handlings zum Betrieb derartiger Anlagen stetig vorangetrieben wird.

Kern der dezentralen Anlage auf Hohtälli ist der MBR. Ausgestattet ist dieser mit 3 Membranmodulen mit 6m<sup>2</sup> Membranfläche (Abbildung 4). Da mittels der installierten Druckdifferenzmesser die spezifische Permeabilität erfasst wurde, konnte während des Betriebszeitraumes das Verhalten der Membranen beobachtet werden (vgl. Abbildung 21).



**Abbildung 21** Verhalten der Permeabilität während der Wintersaison 05/06

Zu Beginn der Wintersaison weisen die 3 eingesetzten Module eine geringe Leistungsfähigkeit auf. Da sie keine Regenerierung erfahren haben und in der Wintersaison 04/05 schlechte Rahmenbedingungen zum Betrieb vorlagen, weisen sie zu Beginn der Saison bereits nur eine Permeabilität von rd. 50 bis 70 l/m<sup>2</sup>\*h\*bar auf. Versuche mit mechanischen und chemischen Reinigung die Permeabilität zu verbessern schlagen fehl, so dass die genannte



Leistung nahezu konstant bleibt. Der Verlust an Permeabilität bzw. die „Verschmutzungen“ der Membranen im spezifischen System dieses MBR's scheint ohne Werksregeneration irreversibel.

Aufgrund höheren Spülwasserbedarfs der Toilettenanlage wird ab Ende Januar ein Modul gegen ein regeneriertes bzw. ein weiteres Anfang Februar gegen ein neues ausgetauscht. Regeneriertes und neues Modul haben zu Anfang ihres Einsatzes in etwa die gleiche Permeabilität von je rd.  $450 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$ . Sukzessiv verlieren beide Module an Permeabilität im Betriebszeitraum 05/06, wobei diese sich auf eine Permeabilität von rd. 200 bis  $250 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$  gegen Ende der Saison einstellt. Das Trendverhalten beider Module ist sehr ähnlich. Die anfänglich vermutete Reduktion der Permeabilität durch PAK-Dosierungen bestätigte sich nicht.

In diesem Zusammenhang ist hinzuweisen, dass neben anderen Faktoren der Feststoffgehalt im MBR Einfluss auf die Permeabilität hat. Im Verlauf des Betriebes stieg der Feststoffgehalt durch Biomassenaufbau und Kohledosierungen von rd.  $6 \text{ gCSB}_{\text{tot}}/\text{l}$  auf rd.  $16 \text{ gCSB}_{\text{tot}}/\text{l}$ . Umso höher der Feststoffgehalt im MBR umso schneller erhöht sich der Filtrationswiderstand des aufgebauten Filterkuchens auf der Membranoberfläche. Verstärkte Überschussschlammnahmen konnten zeitweise die Erhöhung des Feststoffgehaltes verlangsamen. Insgesamt betrachtet hätte ein angepasster Abzug von Betriebsbeginn an stattfinden müssen, so dass der bevorzugte Feststoffgehalt von rd.  $8\text{-}10 \text{ g/l}$  im MBR eingestellt bleibt.

#### **Empfehlung zum Einsatz der Membranen:**

Zu Beginn der Saison sollte mit drei regenerierten Modulen aufgestartet werden (ein weiteres sollte bereitgehalten werden). Bei einer geschätzten Ausgangspermeabilität von  $450 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$  und einem Transmembrandruck von rd. 0.1 bar) sind dies dann rd.  $13.5 \text{ l/min}$  Förderleistung. Aufgrund der benötigten aeroben Kontaktzeit für die vollständige Nitrifikation des Ammoniums empfehlen wir die Förderleistung auf  $8 \text{ l/min}$  zu drosseln, da sonst die Verweilzeit des Abwassers im MBR zu kurz ist. Die Drosselung kann über die Ablaufschläuche erfolgen. An dessen Enden sind Metallröhrchen mit Verschlusschrauben angebracht, welche entsprechend auf den gewünschten Fluss eingestellt werden können. Im Verlauf der Saison sollte die Filterleistung durch Auslitern in Abständen geprüft werden. Unter  $5 \text{ l/min}$  sollte die Förderleistung nicht abfallen. Bei Bedarf kann ein Modul ausgetauscht werden, wenn die Leistung zu gering wird. Der gegen Ende der Saison zum Filtrat-tank zusätzlich zugeschaltete Pufferbehälter sollte unbedingt weiterhin zugeschaltet bleiben, da somit mehr Reserven (total  $3.2 \text{ m}^3$ ) für den Spülwasserbedarf vorgehalten werden können ( $3.2 \text{ m}^3$ ), falls grössere technische Probleme bei der Filtration auftreten. Die Filtration ist zentrales Element der Anlage und ist daher grösserer Aufmerksamkeit zu schenken.

Eine Permeatförderleistung der Membranen von total rd. 5 - 6 Litern pro Minute reicht aus, um in der Wintersaison die notwendige Permeatmenge im Filtratspeicher (bei Betrieb beider Behälter,  $3.2 \text{ m}^3$ ) für den Betrieb vorzuhalten. Dies entspricht einer mittleren Permeabilität von rd.  $200 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$ , wenn  $18 \text{ m}^2$  Membranfläche im Einsatz sind. Eine wesentlich höhere Förderleistung wäre nicht wünschenswert, da dann die aerobe Kontaktzeit (Summe Zeit der belüftete Phasen) des Abwassers im MBR zu gering wird und so keine vollständige Nitrifikation gewährleistet werden kann. Nähere Untersuchungen zu diesem Zusammenhang wurden mit Hilfe der dynamischen Simulation durchgeführt (vgl. Diplomarbeit Abschnitt 3.6.2 und 4.3.2).



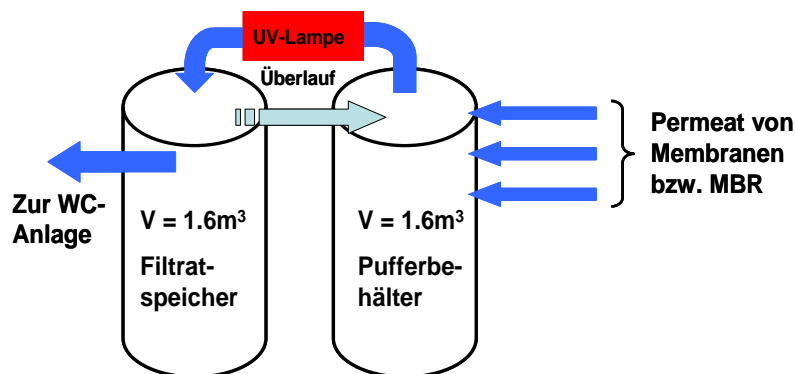
## 4.6 Hygienisierung des Permeates

Die Hygienisierung des Permeates erfolgte über die installierte UV-Lampe. Eine Pumpe förderte fortlaufend gespeichertes Permeat über die Bestrahlungseinheit der Lampe. Durch die geringe Kontaktzeit respektive hohe Förderleistung der Pumpe ist der Hygienisierungseffekt jedoch eher als gering einzuschätzen. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass das geförderte Permeat nahezu keimfrei ist, sollte dieses direkt über die UV-Lampe geführt werden. Im vorliegenden Fall wird gespeichertes Filtrat behandelt, so dass der Hygienisierungseffekt stark vermindert ist. Dies ist durch die spezifische Reaktorhydraulik bedingt, da es immer wieder zu einer Neuverkeimung der Speicherwassers kommt. Die tatsächliche Keimzahl des Spülwassers wurde im Projekt nicht bestimmt.

**Anmerkung / Empfehlung zum Einsatz der Hygienisierung:** Neben dem Grund der Aufsatzung des Filtrates sollten auch aus psychologischen Gründen die Handwaschbecken mit Frischwasser betrieben werden. Die Notwendigkeit einer Hygienisierung des Spülwassers ist offen, dennoch empfehlen wir die Entkeimung der Permeatspeicherbehälter. Um die Speicherbehälter möglichst keimfrei zu halten (Biofilmbildung an den Wänden), sollte etwa 3 mal in der Saison Javel-Wasser ins Filtrat gegeben werden. Dies ist als Reinigungsmittel in Supermärkten erhältlich. Die Konzentration sollte etwa bei 200mg Chlor/l liegen, nach Gebrauch des Spülwassers verbleibt kein Chlor im Wasser, so dass der Belebtschlamm nicht beeinträchtigt wird. Für die nächste Wintersaison kann die UV-Einheit mit Pumpe ausser Betrieb bleiben.

Will man eine möglichst effiziente Hygienisierung betreiben, sollte die Hygienisierung wie folgt umgestaltet werden.

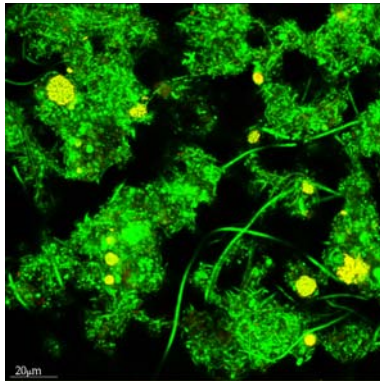
Die Permeatleitungen werden in den Pufferbehälter geleitet. Die Förderpumpe der UV-Anlage wird auf reduzierte Leistung eingestellt um die Kontaktzeit zu erhöhen. Über die vorhandene Niveaumessung im Filtratspeicher wird die UV-Lampe und Förderpumpe ein- und ausgestellt, wenn das Niveau im Filtratspeicher auf Niveau tief fällt. Hierzu sind entsprechende Softwareanpassungen vorzunehmen. Ein Notüberlauf, welcher unter dem Niveau des Überlaufes der Gesamtanlage liegt, gelangt Permeat zurück in den Pufferbehälter, falls die Niveaumessung versagt. Somit wird gewährleistet, dass kein gereinigtes Spülwasser verloren geht. Der Pufferbehälter erhält einen Überlauf zur Abgabe an die Versickerung, wenn im Gesamtsystem mehr Wasser zufließt, als verdunstet.



## 4.7 Identifizierung und Quantifizierung von Nitrifikanten

### /// Hintergrund und Einleitung

Im Rahmen des Projektes sollte herausgefunden werden, ob die Aktivität der Nitrifikanten auch mittels Fluoreszenz-In-Situ-Hybridisierung (FISH) nachweisbar und somit ein Monitoring auf diesem Weg ebenfalls von Nutzen ist.



**Abbildung 22** Nitrifikanten (gelbe Aggregate), mit einem konfokalen Mikroskop untersucht [Foto: R. Manser]

Die Ammonium- und Nitritoxidierer treten hauptsächlich als dichte Aggregate innerhalb der Schlammflocke auf. Unter den Aggregaten versteht man dabei kugelförmige aus Einzelzellen bestehende Zellhaufen (siehe gelbe Aggregate in Abbildung 22). Mit einem an Gensonden angehängten Fluoreszenzfarbstoff wurden die Bakterien angefärbt, um sie anschliessend quantifizieren zu können.

### /// Material und Methoden

Die Quantifizierung erfolgte nach der Methode von Reto Manser et al. (2005) durch Bestimmung des Biomassevolumens der Nitrifikanten pro Belebtschlammflocke.

Für die Bestimmung der Nitrifikantenpopulation wurden vom 21.12.2005 bis zum 12.10.2006 insgesamt 12 Schlammproben aus dem voll durchmischten Membranreaktor entnommen. Die Probenfixierung fand vor Ort (Ausnahme: die zwei Schlammproben im Oktober) und an der Eawag anschliessend die Quantifizierung statt.

### /// Resultate und Diskussion

Die Abweichungen innerhalb der einzelnen Quantifizierungswerte sind derart hoch, dass eine Auswertung nur mit grossen Unsicherheiten verbunden ist. Es lässt sich lediglich eine klare Aussage über die unterschiedliche Belastung der Anlage während der Skisaison und nach Saisonende machen.

Sowohl bei den ammonium- als auch bei den nitritoxidierenden Bakterien wurde während der Saison eine hohe Konzentration an Organismen erfasst, welche ab März 2006 aber zum Teil drastisch abnahm, bevor sich beide Populationen auf einem sehr tiefen Niveau erneut stabilisierten. Die reduzierte Leistung der nitritoxidierenden Bakterien ging bereits aus den Betriebsdaten (vgl. Abbildung 7) hervor und wird durch die Quantifizierung teilweise bestätigt. Die Abnahme der ammoniumoxidierenden Bakterien ist jedoch nicht nachvollziehbar. Die starke Reduzierung deckt sich weder mit den Aktivitätstests noch mit den Betriebsdaten. Dort geht eindeutig hervor, dass es zu keiner Akkumulation von Ammonium kam, ein Abbau also weiterhin stattfand. Ein Grund für dieses abweichende Ergebnis könnte eine Populationsverschiebung sein, welche nicht mit der eingesetzten Gensonde erfasst wurde. Die verwendete Gensonde deckt ein sehr grosses Spektrum an ammoniumoxidierenden Bakterien

ab. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass aufgrund der besonderen Bedingungen im MBR Hohtälli ein spezieller Typ von Ammoniumoxidierern eingewachsen ist und nicht detektiert wurde.

Es zeigt sich, dass die Fluoreszenz-In-Situ-Hybridisierung für einen ersten Trend zwar prinzipiell interessant, als alleiniges Hilfsmittel zur Überwachung der Nitrifikationsleistung aber ungeeignet ist.

## 5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Treibender Faktor für die Initialisierung des Projektes waren neben den hygienischen Aspekten und den Komfortansprüchen unter anderem auch die durch die wasserlosen Toiletten verursachten Betriebs- und Personalkosten.

Die in der Zeit bis 2004 auf der Station Hohtälli bestehenden Trockentoiletten mussten täglich zunächst manuell mit Schlauchbeuteln bestückt werden, welche nach Befüllung der Stapelung zugeführt werden mussten. Der Aufwand der Tätigkeiten im direkten Zusammenhang mit den Trockentoiletten (Reinigungsarbeiten) inklusive dem Aufwand für den Abtransport ins Tal (fahrbare Container zur Seilbahngondel, Seilbahn, fahrbare Container zur Gornergradbahn und retour) beanspruchte einen Mitarbeiter in der Wintersaison zu rd. 50% bzw. 0.5d pro Betriebstag, dies sind bezogen auf die Wintersaison (5 Monate) etwa 70 Arbeitstage - also etwa 30% der Jahresarbeitszeit eines Seilbahnangestellten. Unter Berücksichtigung der neuen Wartungs- und Reinigungsarbeiten für die neue Toilettenanlage und der neuen Kläranlage hat sich der Anteil auf etwa 10 Tage pro Saison reduziert. Dazu kommt neu zusätzlich ein Aufwand von ca. 5 Tagen für Qualitätskontrolle und Überwachung.

Legt man Jahreslohnkosten von 40.000,- € und Lohnnebenkosten von weiteren 8.000,- € zu Grunde (72.000,- SFr./a), berechnen sich die Minderkosten durch die reduzierten Arbeitsaufwände auf rd. 11.000,- € pro Jahr (rd. 18.000,- SFr.).

Kosten für Verbrauchsmaterialien fallen in einer Gesamtwirtschaftlichkeitsrechnung weniger ins Gewicht. Die vergleichsweise hohen Kosten für die Plastikabsacksäcke und deren Entsorgung werden zu einem Teil durch einen höher Energiekostenanteil für den Betrieb der neuen Kläranlage kompensiert, alle Kosten für Verbrauchsmaterialien fallen jedoch in der Summe dennoch zu Gunsten der Kläranlage aus.

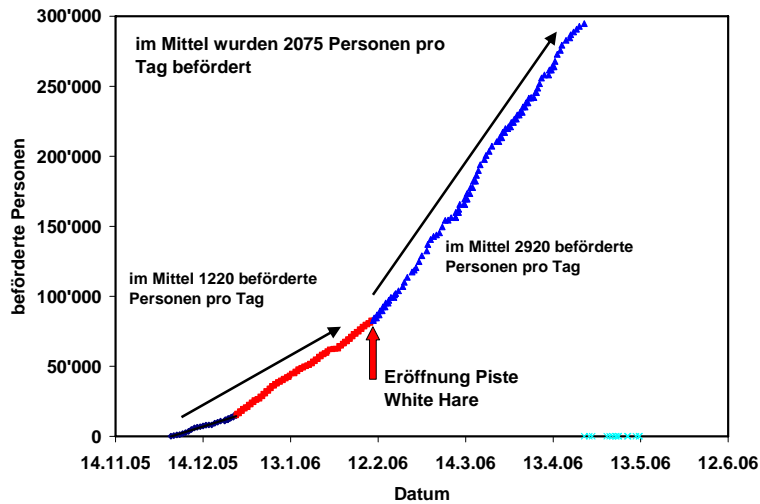
## 6 Spezifische Kennzahlen

Spezifische Kennzahlen der Abwasserbehandlung auf Hohtälli können als Grundlage für die Dimensionierung Neuanlagen dienen, soweit diese gleiche Randbedingungen aufweisen. Auch können mit diesen Angaben Abschätzungen für andere Anwendungen erfolgen, in denen Toilettenabwasser behandelt werden soll. Des Weiteren erlaubt es Zulauffrachten für eine Simulation der Abwasserreinigung zu generieren. Grundlage für die hier durchgeführten Bilanzierungen sind die gemessene Besucherzahlen (Angabe durch die Zermatt Bergbahnen, Messung durch den Ticketgebrauch) und abwasserspezifische Kontrollmessungen während des Betriebes in der Wintersaison 2005/06.

Bei den Bilanzierungen wird davon ausgegangen, dass rd. 10% der Besucher die Toilettenanlage nutzen. Dieses Verhalten kann jedoch in Abhängigkeit der Pistenöffnungen respektive der Witterungsverhältnisse ändern, da dann auch die durchschnittlichen Verweilzeiten der Besucher in der Bergstation ändern.

### /// Besucherzahlen

Der Zustand der Ski-Pisten beeinflusst die Anzahl der Besucher auf Hohtälli. Gesamthaft betrachtet wurden durchschnittlich 2075 Personen pro Tag zur Bergstation in der Wintersaison transportiert. Bei einer differenzierteren Betrachtung wird deutlich, dass erst nach Öffnung der Piste White Hare die Besucherzahl stark anstieg (von 1220 auf 2920 Personen/d, siehe Abbildung 23). Dieser Dynamik ist beim Betrieb der Anlage Rechnung zu tragen, so dass zum Beispiel der Überschussschlammabzug anzupassen und nicht zeitabhängig zu steuern ist.



**Abbildung 23** Verlauf der Besucherzahlen auf Hohtälli

Die Zählung der Besucher auf Hohtälli ist eine sichere Messung zur Bestimmung von Belastungszahlen für die Kläranlage. Da die Messung sehr genau ist, können aus dieser Messung entsprechende Handlungsanweisungen bzw. Betriebsabläufe abgeleitet werden.

### /// spezifischer Abwasseranfall

Der Abwasseranfall ist im Wesentlichen durch die Aktivität im Skigebiet abhängig. Wie bereits **Abbildung 13** zeigt, steigt der tägliche Bedarf von rd.  $0.9\text{m}^3$  auf  $1.4\text{m}^3$  im Verlauf der Saison (Öffnung weiterer Pisten). Zentral ist in diesem Zusammenhang auch das Volumen der Spülkästen der Toilettenanlage. Zu Beginn der Saison haben diese noch ein Spülwasservolumen von rd. 6l, welches im weiteren Verlauf auf 4l reduziert wird. Stellt man die beförderten Personen dem Abwasseraufkommen gegenüber, ergibt sich ein spezifischer Abwasseranfall von rd. **0.6l** bzw. nach Reduktion des Spülwassers von **0.4l pro beförderter Person** (vgl. **Abbildung 24**). **Pro Toilettengang** gelangen rd. **0.1l Urin** in die Kläranlage.

Die zwei Wassermengenmessungen (induktiv, im späteren Verlauf mechanische mit Wasseruhr) wurden unabhängig von einander mittels Auslitern geprüft und bestätigen sich gegenseitig.

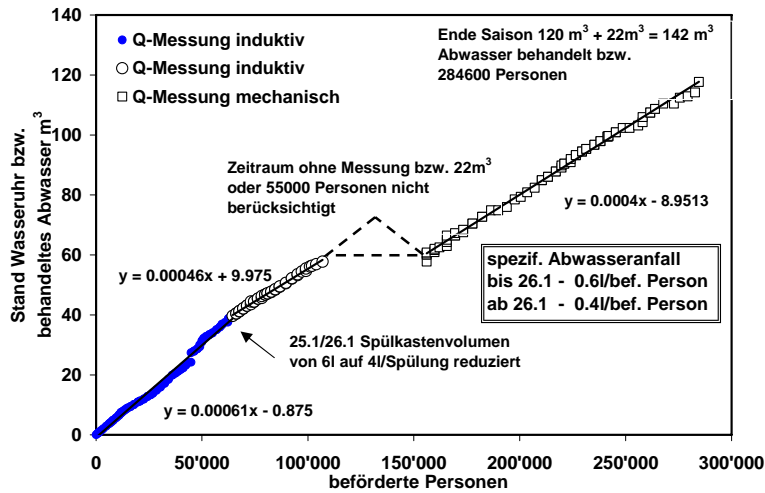


Abbildung 24 Spezifischer und absoluter Wasserverbrauch

/// spezifischer CSB-Fracht im Zulauf und spezifische Überschussschlammproduktion

Die CSB-Bilanz erfolgt aus dem Biomassenzuwachs der sich im Verlauf der Betriebsaison 2005/06 ergeben hat. In der Anfahrphase wurde verstärkt Zucker in die Anlage dosiert, aus dem sich anteilig Biomasse gebildet hat. In dieser Phase ist der Biomassenzuwachs am stärksten.

Wird ein Yield von 0.35 angesetzt (65% des Zuckers werden veratmet), ergibt sich aus dem gesamthaft dosierten Zucker (69kg) rd. 27kg Biomasse (gemessen als  $\text{CSB}_{\text{tot}}$ ). In der Summe haben sich im Betriebszeitraum rd. 84 kg $\text{CSB}_{\text{tot}}$  Biomasse gebildet. Unter Berücksichtigung eines Yield von 0.25 bis 0.4 ergibt sich im Zulauf gesamthaft rd. 210 bis 330 kg $\text{CSB}_{\text{tot}}$ . Unter Berücksichtigung der Zuckerdosierung verbleiben im Zulauf rd. 180 bis 300 kg $\text{CSB}_{\text{tot}}$  aus Toilettegängen. Bezogen auf die gesamte Besucherzahl bzw. der Annahme, dass von diesen 10% auf Toilette gehen, entspricht der  $\text{CSB}_{\text{tot}}$  im Zulauf **0.6 - 1.05 g $\text{CSB}_{\text{tot}}$ /beförderte Person** oder etwa **6-10g $\text{CSB}_{\text{tot}}$ /Toilettenperson**.

Über die ganze Saison wurde rd. 22 kg $\text{CSB}_{\text{tot}}$  in Form von Überschussschlamm der Anlage entzogen.

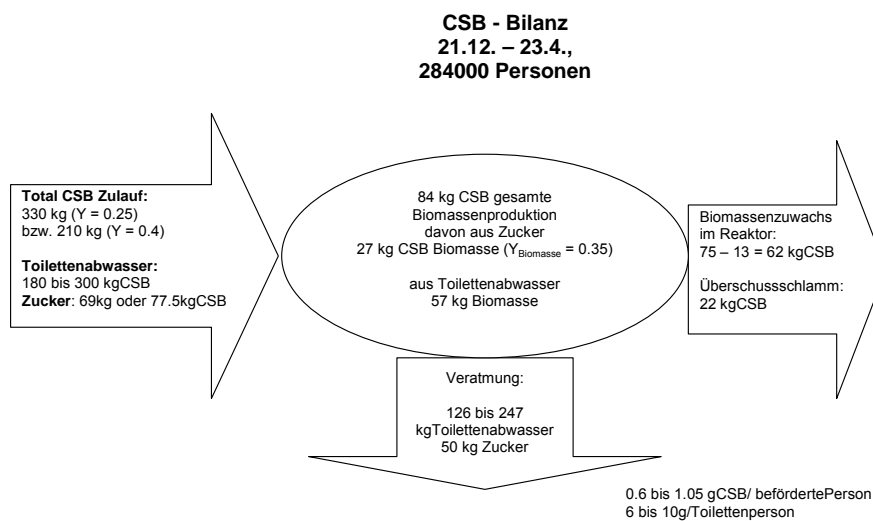


Abbildung 25 CSB-Bilanz über den MBR

### spezifischer Stickstofffracht im Zulauf

Die Stickstoffbilanz wird über den Membranbioreaktor durchgeführt. Die Stickstoffinkorporation in die Biomasse beträgt  $iN_{CSB_{tot}}$  rd.  $0.05 \text{ gN/gCSB}$ . Im Grobstoffabscheider wurden in den letzten Saisonwochen (Abbildung 15) rund  $100 \text{ gNH}_4\text{-N/m}^3$  gemessen. Durch ein RV von 1 ergibt sich in der Summe ein Zulauf zum MBR von ca.  $260 \text{ m}^3$  in der Saison. Dies ergibt gesamthaft einen Eintrag von  $26 \text{ kgNH}_4\text{-N}$  in der Saison, bei 28'400 Personen sind dies  **$0.9 \text{ gN/Toilettenperson}$** . Bei der Annahme von  $0.1 \text{ l Urin/Toilettengang}$  und Person entspricht dies gerade der Konzentration von  $9 \text{ gNH}_4\text{-N/l}$  im reinen Urin, die auch in der Literatur im Mittel angegeben werden. Für die Simulation wird eine Stickstofffracht von  $30 \text{ kgN}_{tot}/\text{Saison}$  berücksichtigt bzw. ergibt dieses  **$0.09 \text{ gN/beförderte Person}$** .

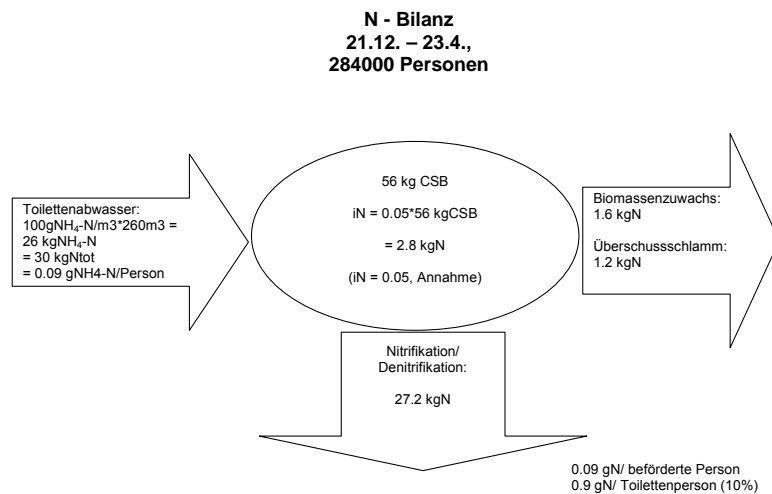
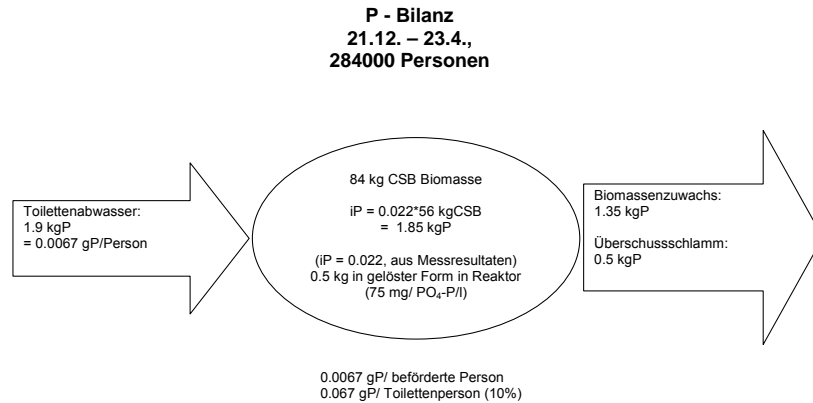


Abbildung 26 Stickstoffbilanz über den MBR

### spezifische Phosphorfracht im Zulauf

Auf Basis des Biomassenaufbaus in der Biologie kann eine Phosphorbilanz vorgenommen werden. Schlammuntersuchungen ergaben im Mittel einen  $iP_{CSB_{tot}}$  von rd.  $0.020$  bis  $0.023$ . Diese Werte sind nur als sehr leicht erhöht anzusehen. Bei einer gesamten Biomassenproduktion von rd.  $84 \text{ kgCSB}_{tot}$  im Betriebszeitraum sind somit rd.  $1.85 \text{ kg Phosphor}$  in der Biomasse inkorporiert. Gegen Ende der Saison waren rd.  $80 \text{ mg PO}_4\text{-P/l}$  in der Anlage in gelöster Form, so dass nochmals etwa  $0.5 \text{ kg}$  in der Anlage in gelöster Form beinhaltet sind.

In der Summe ergibt dies rd.  $1.9 \text{ kg}$  für den gesamten Betriebszeitraum, die durch Abwasserzulauf in die Anlage gelangten. Hieraus ergibt sich eine spezifische Zulauffracht von  **$0.0067 \text{ gP/bef. Person}$**  oder  **$0.067 \text{ g/Toilettengang}$**  oder  **$0.67 \text{ gP/l Urin}$** , welches dem Literaturwert von  $1 \text{ gP/l}$  sehr nahe kommt.



**Abbildung 27** Phosphorbilanz über den MBR

### /// spezifische Überschussschlammproduktion

Im gesamten Betriebszeitraum 2005/06 sind in der Kläranlage 84kgCSB<sub>tot</sub> Biomasse produziert worden. In der kommenden Saison wird davon ausgegangen, dass möglichst wenig Zucker dosiert werden muss. Dieser sollte nur eingesetzt werden, wenn eine unzureichende Denitrifikation im MBR erfolgt bzw. der pH-Wert am Ende der belüfteten Phase wesentlich unter 7.0 ist.

Mit der Annahme, dass zukünftig 2/3 weniger Zucker dosiert wird, kann mit einer reduzierten Biomassenproduktion von rd. 75 kg CSB<sub>tot</sub> gerechnet werden. Zusätzlich zu dieser Feststoffproduktion ergibt sich eine Zunahme der Feststoffe in der Anlage durch PAK-Dosierungen. Werden im Mittel 30 bis 40 mgPAK/bef. Person dosiert und unter der Annahme einer spezifischen Biomassenproduktion von 0.26 g/bef. Person (angesetzt iCSB<sub>TSS</sub> rd. 1), ergibt sich eine Feststoffproduktion von rd. 0.3 gFeststoff/bef. Person.

### /// spezifischer Energiebedarf

In kommunalen Abwasserreinigungsanlagen mit Membranbiologie beträgt der spezifische Energiebedarf für die Reinigung von einem m<sup>3</sup> Abwasser rd. 1 kWh (Stein u.a., 2003, Wedi, 2004). Die Kläranlage Hohtälli verbraucht demgegenüber rd. **11.5 bzw. 15 kWh/m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser**. Dieser grosse Unterschied resultiert aus verschiedenen Gründen.

Das Abwasser im Zulauf zu kommunalen Anlagen ist etwa 10 bis 15 mal weniger konzentriert als das Toilettenabwasser auf Hohtälli. Ein weiterer Aspekt ist die Grösse der Abwasserreinigungsanlage, da grosse Anlagen proportional zum Abwasseraufkommen effizienter arbeiten können. Anlagenaggregate der Kläranlage Hohtälli wurden nicht auf Energieeffizienz ausgelegt, sondern auf Funktionalität und Robustheit. Anteilig grosse Energieverbraucher sind die UV-Desinfektion mit Pumpe, welche kontinuierlich betrieben wird, die Umwälzpumpe und das Hauswasserwerk. Würde die Anlage unter energetischen Aspekten überarbeitet und optimiert, könnte gegebenenfalls der spezifische Energiebedarf auf rd. 6-8 kWh/m<sup>3</sup> behandeltes Abwasser gesenkt werden.



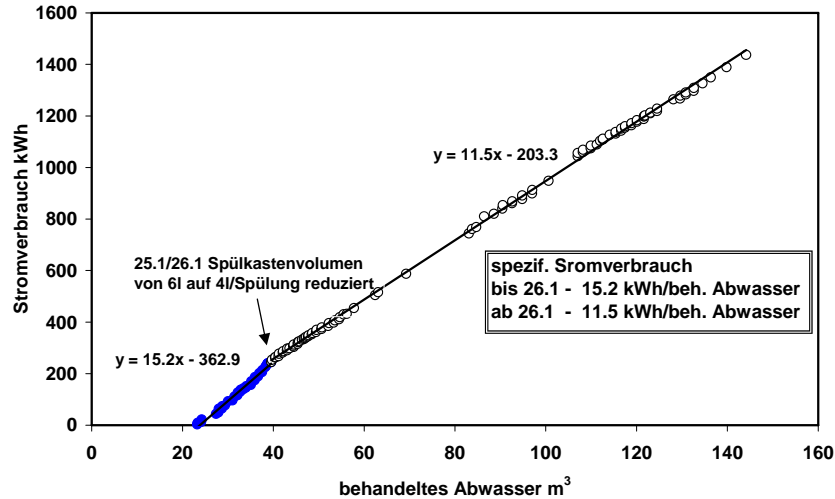


Abbildung 28 Spezifischer und absoluter Energieverbrauch der Abwasserreinigungsanlage

/// Zusammenstellung Betriebsgrößen und Kennzahlen

Nachfolgend die wesentlichen Kenngrößen zum Betrieb der Anlage und spezifische Kennzahlen der Abwasserreinigung:

Tabelle 2 Kenndaten zum MBR-Betrieb auf der Bergstation Hochtälli

<b>spezifische Kennzahlen</b>	
<i>Zulauf</i>	
Q <sub>Urin</sub>	0.1 l/Toilettengang bzw. 0.01 l/bef. Person
Q <sub>Spülung</sub>	4 l/Toilettengang bzw. 0.4 l/bef. Person
CSB <sub>tot</sub> -Fracht	6-10 gCSB <sub>tot</sub> /Toilettengang bzw. 0.6-1.0 gCSB <sub>tot</sub> /bef. Person
N <sub>tot</sub> -Fracht	9 gN <sub>tot</sub> /Toilettengang bzw. 0.9 gN <sub>tot</sub> /bef. Person
P <sub>tot</sub> -Fracht	0.7 gP <sub>tot</sub> /Toilettengang bzw. 0.07 gP <sub>tot</sub> /bef. Person
<b>Betriebsgrößen</b>	
<b>Kläranlage Hochtälli</b>	
Besucherzahlen (stark abhängig von der Anzahl der geöffneten Ski-Pisten respektive Schneeverhältnissen, welche jährlich variieren können)	ohne White Hare „Vorsaison“ rd. 1200 Personen/d bzw. bei vollem Betrieb aller Pisten „Hauptsaison“ rd. 2900 Personen/d, als mittlere Belastung in der Saison ist von 2100 Personen auszugehen
spezif. Abwasseranfall (abhängig Zeitpunkt Öffnung Pisten)	1.4 bis 1.9 m <sup>3</sup> /Tag
spezif. Überschussschlammproduktion	3 gCSB <sub>tot</sub> /Toilettengang bzw. 0.3 gCSB <sub>tot</sub> /bef. Person
spezif. PAK-Dosierung	50-100 gPAK/m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser bzw. rd. 30mgPAK/bef. Person oder im Mittel etwa 0.03gPAK/beförderte Person
spezif. Stromverbrauch	11.5 kWh/m <sup>3</sup> behandeltes Abwasser (Ergebnis Ende Saison 05/06) 45 Wh/beförderte Person

## 7 Modellierung und Simulation

### 7.1 Hintergrund zur Modellierung

Mathematische Modelle stellen eine Abstraktion und Vereinfachung der Wirklichkeit dar und fassen die verallgemeinerten Gesetzmässigkeiten in der Sprache der Mathematik zusammen. Die Nachbildung physikalischer, technischer oder biologischer Prozesse, Verfahren oder Systeme durch Modelle gestattet es, das Verhalten einer Kläranlage und der ablaufenden komplexen hydraulischen und biochemischen Prozesse der Abwasserreinigung darzustellen und zu analysieren.

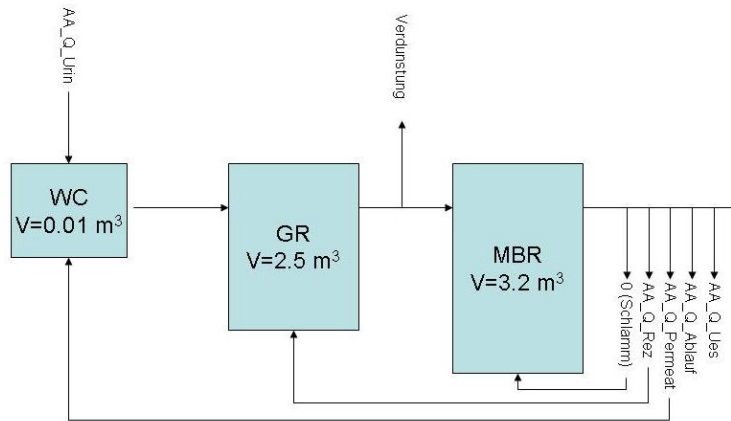
Auf Basis eines Modells lässt sich eine dynamische Simulation durchführen, welches durch numerische Integration von Stoffbilanzen erlaubt, eine zeitabhängige Prognose des Verhaltens der Anlagen zu machen. Hierbei wird das Zeitverhalten interessierender Konzentrationen von Stoffen und anderer prozessrelevanter Grössen berechnet.

Als Modellgrundlage für die dynamische Simulation der Kläranlage Hohtälli dient das von der internationalen Water Association erarbeitete Activated Sludge Modell 3 (ASM3) (Gujer et al. 1999). Erweitert wurde das Modell für die Abbildung der biologischen P-Elimination (Eawag-BioP-Modul, Rieger et al., 2001). Um eine differenziertere Betrachtung der zweistufigen Nitrifikation und der Denitrifikation über Nitrit durchführen zu können, wurden im ASM3 die stöchiometrischen Koeffizienten angepasst (vgl. Anhang Dilomarbeit). Als Simulationstool diente AQUASIM, Version 2.1b, eine von der Eawag entwickelte Software für die Simulation aquatischer Systeme.

### 7.2 Abbildung der Anlage - Datengrundlagen

Das Kläranlagenmodell für die Simulation besteht aus 3 voll durchmischten Reaktoren (**Abbildung 29**). Der erste Reaktor, die WC-Anlage, wird mit einem kleinen Volumen von  $0.01 \text{ m}^3$  abgebildet. Er dient zur Vermischung des zufließenden Urins und der Fäkalien mit dem zurückgeführten Permeat (Spülwasser).

Im Grobstoffabscheider (GR,  $V = 2.5 \text{ m}^3$ ) wird das Abwasser gesammelt, gespeichert und über den Schlammrücklauf verdünnt. Die Belastung der Biologie im MBR wird auf diese Weise relativ konstant durch einen gleichmässigen Zulauf gehalten. In der Anfangsphase dient der GR im Wesentlichen nur als Speicherbehälter. Im weiteren Verlauf der Saison, in der die Rückführung des Schlammes aus dem MBR in den GR vergrössert wurde, dient der GR zunehmend auch als biologisch aktiver Reaktor. Der dritte Reaktor im Simulationsmodell ist der Membranreaktor. Er wird mit einem Volumen von  $3.2 \text{ m}^3$  abgebildet. Die Belastung des Membranbioreaktors mit Abwasser erfolgt chargenweise. Das Permeat wird durch die Verbindung zwischen dem Membranreaktor und dem WC-Reaktor im Kreis geführt. Die Zyklustaktung von 30min unbelüftet und 30min belüftet wird in dieser Rückführung berücksichtigt, sie wird alternierend zur Belüftung implementiert. Es wird nur Permeat zurückgeführt und der MBR belastet, wenn die Belüftung ausgeschaltet ist (Anaerobphase für die Denitrifikation). Dies ist eine Vereinfachung, da der Permeatabzug nur während der aeroben Phase erfolgt.



**Abbildung 29** Systemplan für die Modellierung der Kläranlage

Ein Taktzyklus dauert 1h, wobei während 30min Abwasser in den Membranreaktor gefördert wird und die folgenden 30min belüftet wird. Die Anzahl der Taktzyklen pro Tag ist abhängig vom anfallenden Tagesfluss von Abwasser und der Filterleistung der Membranmodule. Die tägliche Anzahl Zyklen werden durch den Abwasseranfall als auch durch die Permeabilität der Membranen bestimmt.

Die Membran wird im AQUASIM durch den Rückhalt aller partikulären Stoffe (ideale Nachkä- rung) bzw. durch nur Abführung von Permeat aus dem MBR dargestellt. Der Filtrattank wird nicht abgebildet, da die Volumina im Modell als konstant angenommen werden und das Speichervolumen des Filtrattankes die Abbildung des Stoffabbaus im Modell nicht beeinflusst (keine aktive Biomasse im Speicher).

Die Zulaufmengen ergeben sich aus dem Urinfluss. Dieser ist abhängig von der Anzahl beför- dert Personen. Aufgrund des Verhaltens der Besucher wird davon ausgegangen, dass in der Vorsaison 10% und in der Hauptsaison 14% der Besucher die Toilettenanlage nutzen. Dieses ergibt sich aus dem unterschiedlichen Verhalten der Wintersportler bei Öffnung der verschiedenen Skipisten. Die Zusammensetzung des Urin respektive des anfallenden Ab- wassers ergibt sich aus den Massenbilanzen (vgl. Tabelle 2).

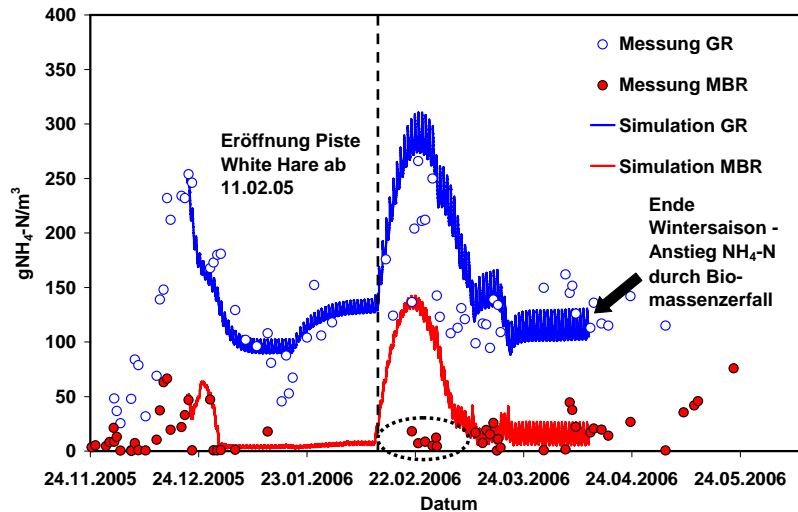
Simuliert wird die gesamte Betriebszeit 2005/06 (124 Tage), wobei aufgrund der verschiede- nen Betriebsweisen die Betriebszeit in verschiedene Phasen aufgeteilt ist.

Eine detaillierte Beschreibung der Betriebsphasen und deren spezifischen Lastansätze fin- den sich in der Diplomarbeit (siehe Anhang).

### 7.3 Kalibrierung

#### ▄ Abbildung Nitrifikation

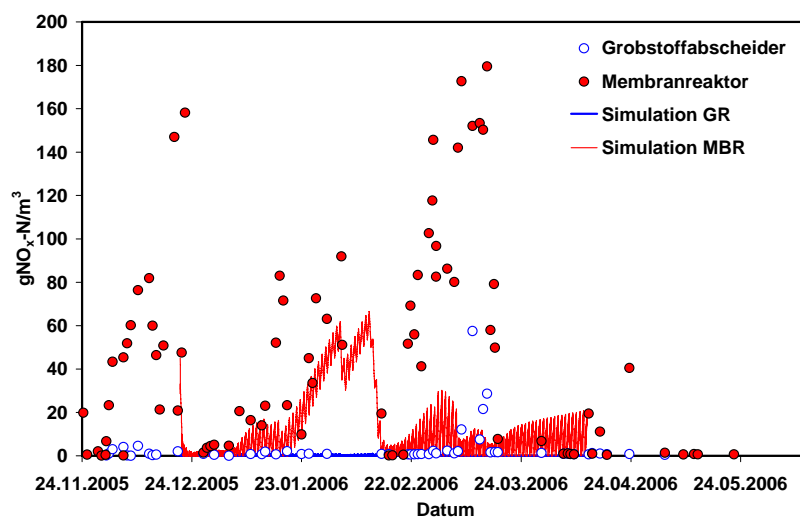
Mit dem erstellten Modell kann die Nitrifikationsleistung der Anlage über die Saison gut abgebildet werden. Qualitativ als auch quantitativ korrespondieren die simulierten Ammoniumwerte mit den Kontrollmessungen (Abbildung 30).



**Abbildung 30** Gemessener und simulierter Verlauf der Ammoniumkonzentration in GR und MBR

Weniger gut lässt sich der sprunghafte, starke Fracht-Anstieg bedingt durch die Pistenöffnung White Hare abbilden. Im Modell erhöht sich die Biomasse (Nitrifikanten) durch Wachstum nicht so schnell wie es das reale Verhalten aufzeigt. Hierdurch bedingt kommt es zeitweise zu einer Akkumulation von Ammonium im Modell, welches sich im weiteren Verlauf aber in der Anlage abbaut. In der Realität scheint zu diesem Zeitpunkt eine höhere Nitrifikationsleistung des Schlammes vorhanden gewesen zu sein, als es die Simulation wiedergibt.

#### ▄ Abbildung Denitrifikation



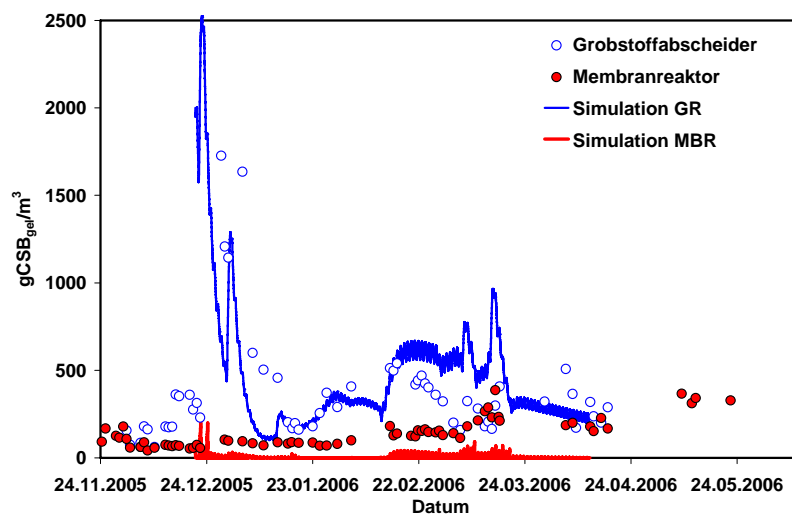
**Abbildung 31** Gemessener und simulierter Verlauf der NO<sub>x</sub>-konzentration (NO<sub>2</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N) in GR und MBR

Die in der Simulation fehlende Nitrifikationsleistung in der Phase des verstärkten Ammoniumzulaufes (Pisteneröffnung) findet sich ebenfalls im Verlauf der NO<sub>x</sub>-Werte (Nitrit und Nitrat

als Summe) wieder. In dieser Phase wird in der Simulation zu wenig Nitrit/Nitrat gebildet, so dass im Vergleich zur Messung im Modell geringere Konzentrationen als in der Anlage vorliegen. Insgesamt wird in der Simulation die Denitrifikation quantitativ überschätzt. Eventuell ist bei der Beurteilung der CSB-Fraktionierung der inerte CSB-Anteil am  $CSB_{tot}$  zu gering eingeschätzt worden.

### /// **Abbildung Kohlenstoffelimination bzw. Biomassenzuwachs**

Die gelösten organischen Stoffe im GR können gut abgebildet werden. (Abbildung 32). Die künstlichen Substratzugaben in den GR ( $CSB_{gel}$  in der Form von gelöstem Zucker) werden vom Modell etwas überhöht abgebildet, wobei jedoch der saisonale Verlauf qualitativ gut reproduziert wird. Der gelöste CSB im MBR wird unterschätzt bzw. akkumuliert in der Realität der inerte CSB in der Anlage durch die Rezirkulation. Das Belebtschlammmodell ASM3 kann diesen Zusammenhang nicht abbilden, da es für konventionelle Anlage erstellt wurde. In diesen Anlagen respektive im Modell passiert der  $CSN_{inert}$  die Anlage (Zulauf = Ablauf). In der Realität wird jedoch inerte CSB (wie auch im MBR auf Hohtälli) gebildet durch Zerfall von Biomasse, daher steigt tendenziell der  $CSB_{gel}$  im MBR. Das Belebtschlammmodell ASM3 stößt hier an die Grenzen der Anwendbarkeit auf das spezifische System der biologischen Abwasserreinigung mit nahezu geschlossenem Kreislauf.



**Abbildung 32** Gemessener und simulierter Verlauf der  $CSB_{gel}$ -Konzentration in GR und MBR

Der Verlauf des  $CSB_{tot}$  (**Abbildung 32**) in den Reaktoren kann in der Vorsaison relativ gut abgebildet werden. Im weiteren Verlauf zeigen die Simulationsergebnisse sowohl für GR als auch für den MBR tendenziell zu geringe Konzentrationen bezüglich partikulärer Stoffe an. Eventuell kann der Überschussschlammabzug nicht genügend genau abgebildet werden, da hier die Aufzeichnungen von Menge des Abzuges und TS-Konzentration des Überschussschlammes teilweise abgeschätzt werden mussten.

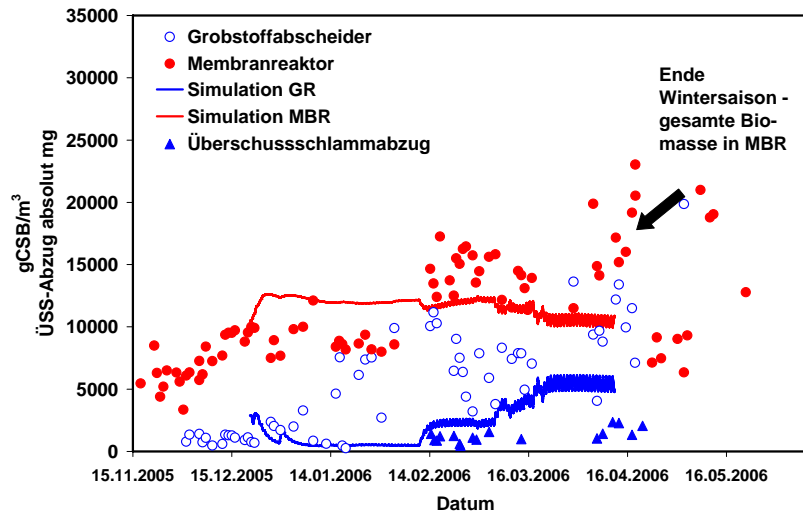


Abbildung 33 Gemessener und simulierter Verlauf der CSB<sub>tot</sub>-Konzentration in GR und MBR

/// **Abbildung Phosphatakkumulation bzw. Elimination - BioP-Aktivität**

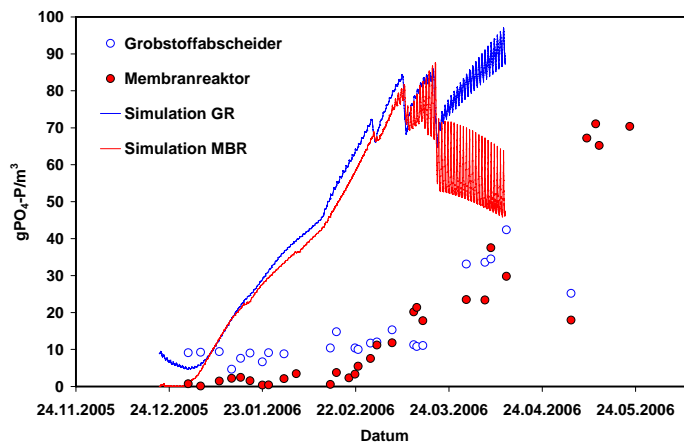


Abbildung 34 Gemessener und simulierter Verlauf der Orthophosphat-Konzentration in GR und MBR

Die modellierten gelösten Phosphatkonzentrationen entsprechen zu Beginn der Saison nicht den gemessenen PO<sub>4</sub>-P-Konzentrationen. (**Abbildung 34**). In der Betriebsaison bleibt die PO<sub>4</sub>-P-Konzentration in der Anlage bis zum 22.2.2006 konstant tief und beginnt erst dann anzusteigen. Ab diesem Zeitpunkt weisen die Messwerte auf eine deutliche PO<sub>4</sub>-P-Akkumulation in der Anlage hin. In der Simulation hingegen kommt es von Beginn an zu einer Akkumulation von gelöstem Phosphor. Wie bereits aufgezeigt könnten Fällungsreaktionen in der ersten Zeit des Betriebes für den konstanten PO<sub>4</sub>-P-Gehalt in der Anlage verantwortlich sein, in der Modellierung wurde die chemische P-Elimination nicht berücksichtigt. Der Verlauf der Akkumulation (Steigung) in der Realität deckt sich dennoch mit dem simulierten Anstieg, ist jedoch zeitlich verzögert.

### 7.4 Simulation von Optimierungsszenarien

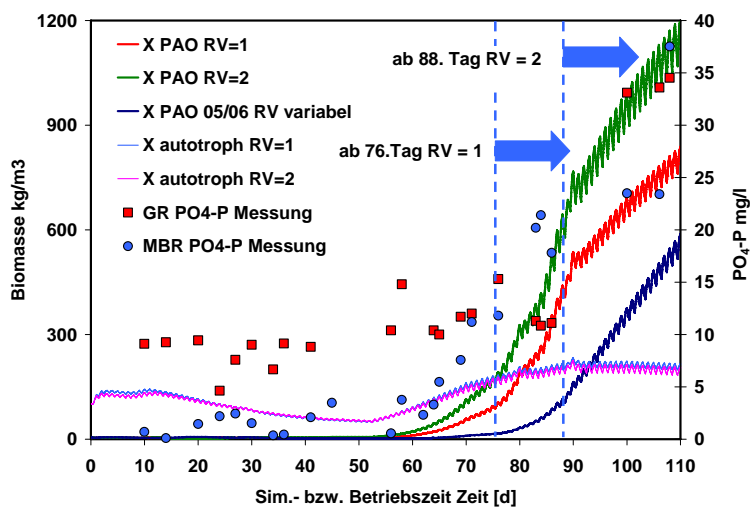
Trotz der nicht durchgängig zufrieden stellenden Kalibrierung des Modells werden Vorschläge zur Optimierung des Betriebes auf Basis von Simulationen erarbeitet. In den Simulationen werden die aus der Kalibration ermittelten Modellparameter beibehalten und nur die zu optimierenden Betriebsparameter neu definiert. Die Optimierungsvarianten konzentrieren



sich auf den Einfluss verschiedener Rücklaufschlammverhältnissen und der Leistungsfähigkeit der Membrane (Permeabilität).

### /// Einfluss des Rücklaufschlammverhältnisses auf die BioP-Aktivität

Die Betriebsergebnisse der Kläranlage und die Aktivitätstest gegen Ende der Wintersaison haben deutlich aufgezeigt, dass bei Erhöhung des RV eine Verbesserung der Nährstoffelimination allgemein erreicht werden kann. Auch zeigte sich, dass durch diese verfahrenstechnische Randbedingung ein Einwachsen der BioP-Aktivität möglich ist. Um den Einfluss eines erhöhten RV auf die Biologie des Membranbioreaktors abschätzen zu können, wurden Simulationen mit verschiedenen Rücklaufschlammverhältnisse durchgeführt. Für die Simulationsvarianten wurde ein RV von 1 und von 2 gewählt. Um einen Vergleich anstellen zu können, wurden als Referenz auch die Ergebnisse der Kalibration dargestellt, welche auf den Betriebskenngrößen der Wintersaison 05/06 basieren.



**Abbildung 35** Simulation verschiedener Rücklaufschlammverhältnisse bzw. des Einwachsens der BioP-Aktivität

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen auf, dass bei Einführung eines RV = 1 das Einwachsen der phosphorakkumulierenden Organismen (PAOs) deutlich begünstigt wird. In der Simulation mit Betriebsdaten der Wintersaison 05/06 kommt es erst ab dem 75. Simulationstag (ab 6.03.06) zu einem Einwachsen der PAOs, da ab diesem Datum ein RV von 1 eingestellt wurde, im Zeitraum vorher wurde kein nennenswerter Rücklauf betrieben. Würde von Beginn ab ein RV  $\geq 1$  betrieben, wachsen die PAOs vergleichsweise schneller ein, als in der Referenz (bereits ab dem 55 Tag). Ein RV von 2 ist im Vergleich zu RV=1 bezüglich der Akkumulationsgeschwindigkeit der PAOs nochmals günstiger bzw. beschleunigt. Die Konzentration der autotrophen Biomasse wird durch das RV nicht tangiert.

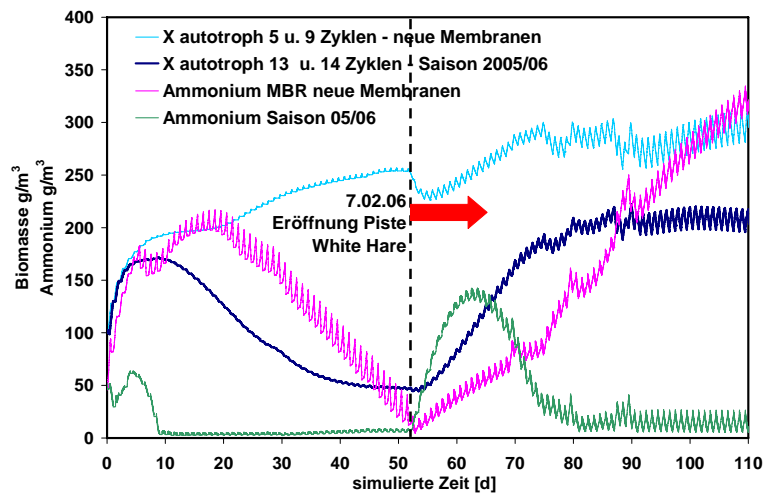
### /// Einfluss der Leistung der Membranen (Permeabilität) auf die Nährstoffelimination

In einem zweiten Optimierungsszenario liegt der Fokus auf der Membranpermeabilität. Durch eine sehr effiziente Membran mit hoher Permeabilität würde das Wasser schneller abfiltriert bzw. das Niveau im MBR schnell reduziert werden und das Permeat steht somit auch schneller wieder im Filtratspeicher zur Verfügung. Es müssten weniger Zyklen gefahren werden, was die absolute Betriebszeit und den Energieverbrauch der Anlage reduzieren würde. Die Membranpermeabilität beeinflusst die Anzahl der Filtrationszyklen und somit die aerobe Kontaktzeit des Abwassers mit dem belebten Schlamm.

In der Saison 05/06 lag die mittlere Filtrationsleistung der Membranen bei rd.  $9\text{l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ . In der Vorsaison lag sie bei nur rd.  $6\text{l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  und in der Hauptsaison bei  $11\text{l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ . Bei den mittleren täglichen Abwasseranfällen von  $0.9\text{m}^3/\text{d}$  bzw. später  $1.4\text{m}^3/\text{d}$  führt dies zu 14 bzw. 13 Zyklen/d.

Eine gut funktionierende neue oder revidierte Membran weist eine Permeabilität von rd.  $20\text{l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  auf. Würde im MBR auf Hohtälli diese hohe Permeabilität durchgehend erreicht, würde bei dem oben genannten Abwasseraufkommen eine Zyklenanzahl von 5 Zyklen/d in der Vorsaison und 9 Zyklen/d in der Hauptsaison resultieren.

Die Simulation mit hoher Permeabilität respektiven hoher Filtrationsleistung zeigt auf, dass bei einer hohen Belastung (hohe Ammoniumfracht im Zulauf) das Ammonium nicht hinreichend abgebaut werden kann bzw. die Nitrifikation nicht alles Ammonium umsetzen kann ( $\text{NH}_4\text{-N}$  akkumuliert im System, vgl. Abbildung 36). Die aerobe Kontaktzeit des Abwassers ist zu gering, um eine vollständige Nitrifikation zu erreichen.



**Abbildung 36:** Vergleich des  $\text{NH}_4\text{-N}$  Konzentration im Permeat des MBR bei unterschiedlicher Filtrationsleistung der membranen

Verbleibt ein Rest Ammonium im Permeat akkumuliert mit der Zeit Ammonium im System und die gewünschte Reinigungsleistung der Anlage würde nicht erreicht (Ablaufqualität). Dieser Effekt wird in der Simulation der realen Betriebsdaten auch beobachtet (starke Erhöhung der Ammoniumzulaufmenge durch Eröffnung der Piste White Hare), jedoch kann das System nach einer gewissen Adaption der Biomasse die akkumulierte Ammoniumkonzentration im MBR abbauen. Im Vergleich zur Kalibration zeigt sich der beschriebene Effekt sehr viel deutlicher, wobei die akkumulierte Ammoniummenge im System nicht mehr abgebaut werden kann. Durch die verringerte Kontaktzeit wird gesamthaft zu wenig Sauerstoff in den MBR eingetragen. Trotz hoher Konzentration an autotrophen Organismen im Belebtschlamm, ist die aerobe Kontaktzeit des Abwassers zu gering, um eine vollständige Nitrifikation des Ammoniums zu erreichen.

## 8 Gesamtbetrachtung - Umsetzung des Projektplans

Die Eawag hat gemeinsam mit den Partnern einen Projektplan erstellt und für eine Bewertung der Ergebnisse Erfolgskriterien im Proposal formuliert. Um die Beurteilung vornehmen zu können, sollen hier nochmals die Kriterien aufgelistet werden und gleichzeitig bewertet werden:

### formulierte Erfolgskriterien:

- *kann eine vollständige Nitrifikation im System erreicht werden ( $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt des Permeates)*

In der Kläranlage Hochtälli konnte sich aufgrund der neuen und optimierten Betriebsweise eine Biologie aus dem Animpfschlamm adaptieren und etablieren, welches eine vollständige Nitrifikation des Ammoniums des Toilettenabwassers gewährleistet. Im Ablauf der Anlage, welcher quantitativ aufgrund starker Verdunstung gering ist, verbleiben rd. 0 - 5 mg  $\text{NH}_4\text{-N/l}$ . Im nahezu geschlossenem System der Anlage kommt es nicht zu einer Akkumulation von Ammonium. Durch die Etablierung der Denitrifikation kann durch Bildung von Bikarbonat ein quasistabiler pH-Wert von 6.8 bis 7.5 erreicht werden, der einen gesicherten Betrieb der Nitrifikation gewährleistet.

- *kann eine Denitrifikation im System erreicht werden (Gesamtstickstoffablaufwerte)*

Nitrit und Nitrat können vollständig eliminiert werden. Da gegen Ende der Betriebssaison im Wesentlichen nur Nitrit und wenig Nitrat in der Nitrifikation gebildet wurde, war der spezifische Kohlenstoffbedarf geringer. Anfängliche Substratdosierungen in Form von Zucker waren im Verlauf nicht mehr notwendig. Insbesondere eine optimierte Hydrolyse von organischen Feststoffen (Papier und Fäkalien) im GR begünstigten die 100%-tige Entstickung des Toilettenabwassers. Eine vermutete Limitierung der Denitrifikation durch zu wenig CSB-Fracht im Toilettenwasser bestätigte sich nicht.

- *kann ein gut mineralisierter Belebtschlamm produziert werden (Glühverlust, Schlammuntersuchungen)*

Aufgrund des hohen Schlammalters kommt es zu einer guten Mineralisierung des belebten Schlammes. Zu Beginn der Wintersaison beträgt der Glühverlust etwa 65 bis 70%, wobei im weiteren Verlauf durch PAK-Dosierungen der GV auf rd. 50 bis 55% sinkt. Hierdurch bedingt lässt sich der Schlamm sehr gut in den Filtersäcken entwässern und somit gut mit dem festen Abfall entsorgen (als Kehricht).

- *können externe Substratdosierungen verringert oder vermieden werden*

Zu Beginn der Saison wurde die Biologie auf erhöhte Nährstofffrachten (Ammonium) durch künstliche Substratgaben vorbereitet. Im Verlauf des Winterbetriebes waren Substratdosierungen nicht mehr notwendig. Es zeichnet sich ab, dass der Belebtschlamm auch nach dem Sommerbetrieb mit sehr kleiner Belüftung kaum Nitrifikanten verliert und daher eine ausreichende Nitrifikationsleistung aufweist. Ammoniumdosierungen vor der neuen Saison 06/07 zum Anfahren bzw. Adaptieren der Biomasse werden wahrscheinlich nicht mehr notwendig sein. Bezüglich der Zuckerdosierungen ist davon auszugehen, dass nur im absoluten Notfall (Abfallen des pH unter 6.5) eine Dosierung zur verbesserten Denitrifikation notwendig wird.

- *kann eine hohe Permeabilität respektive Filtrationsleistung der Membranen aufrecht erhalten werden*

Der Verlust der Permeabilität der eingesetzten, teilweise neuen Membranen konnte durch mechanische und chemische Spülungen nicht rückgängig gemacht werden. Die Verunreinigungen der Membranen durch das spezifische Abwasser bzw. Belebtschlammgemisch scheinen irreversibel zu sein. Ob eine intensive Werksreinigung eine Regenerierung bis hin zur Ausgangspermeabilität der Membran erreicht werden kann, muss seitens des Herstellers abgeklärt werden. Vor Beginn einer neuen Saison sollte mit revidierten bzw. neuen Modulen aufgestartet werden.

- *kann ein für den Spülwasserbetrieb der Toilettenanlage geeignetes Permeat durch die Reinigung hergestellt werden?*

Eine effiziente Entfärbung konnte mit Dosierung von Pulveraktivkohle in den MBR erreicht werden. Im Verlauf des Betriebes konnten die Dosiermengen für Aktivkohle bestimmt werden, welche ein farblich akzeptables Spülwasser produzieren. Das produzierte Permeat war sowohl farblich als auch bezüglich des Geruches als Spülwasser geeignet.

- *Wasserverbrauch respektive Austauschvolumen, falls eine Akkumulation von Stoffen Probleme schafft*

Die Akkumulation von Stoffen respektive Salzen hat in der Betriebssaison 05/06 zu keinen Betriebsproblemen geführt. Die Biologie konnte sich an den steigenden Salzgehalt (Leitfähigkeit) adaptieren, wobei für kommende Saisonen dennoch empfohlen wird, einen kleinen Teil des Zulaufes als Frischwasserzulauf aus den Handwaschbecken zu generieren, um Ausfällungen und die damit verbundenen Probleme zu umgehen.

- *Verringerung des Personalbedarfs (weniger Störfalleinsätze [h/d])*

In der Wintersaison 05/06 wurde ein intensives Monitoring seitens der Eawag durchgeführt. Aufgrund von vorgenommenen Betriebsoptimierungen und Kontrollmessungen war der Arbeitsaufwand zur Betreuung erhöht, aber dennoch vergleichsweise geringer, da mit dem alten System der Trockentoiletten 1 Person 50% täglich in der Saison für Reinigung der Toiletten und Transport der Fäkalien beschäftigt war. Zukünftig wird nur noch ein geringer Betriebs- und Kontrollaufwand notwendig sein, da viele Prozesse automatisiert sind oder automatisiert werden sollen.

## 9 Öffentlichkeitsarbeit

Zur Verbreitung der Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes eine Reihe von Aktivitäten zum Wissenstransfer unternommen. Neben den nachfolgend aufgelisteten Aktivitäten und Veröffentlichungen sind weitere Publikationen in englisch und im deutschsprachigen Raum geplant.

- Dokumentation des Projektes mittels Poster und Flyer (englisch/deutsch) direkt vor der Toilettenanlage in der Seilbahnstation Hohtälli (Zermatt)
- Präsentation des Projektes mit Berichten auf der Internetseite der Eawag ([http://www.eawag.ch/research/ing/vt/boehler\\_zermatt/boehler\\_zermatt.htm](http://www.eawag.ch/research/ing/vt/boehler_zermatt/boehler_zermatt.htm))
- Beitrag als Vortragspräsentation zur IWA-Konferenz Advanced Sanitation, 2007 in Aachen, mit dem Titel „Treatment of Toilet Wastewater for Re-use in an MBR“, Marc Boehler, Adriano Joss, Simone Buetzer, Martin Holzapfel, Hermann Mooser und Hansruedi Siegrist
- Bewerbung um den 1. Muehlheim Water Award 2006, unterstützt von der International Water Association (IWA), London, durchgeführt durch das IWW Rheinisch-Westfälischen Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, gestiftet durch die RWE Aqua GmbH und die RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH
- Zeitungsartikel „Aus Abwasser wird Nutzwasser“, Autor Martin Holzapfel, in den Verbandsnachrichten der Vereinigung Technischer Kader Schweizer Seilbahnen (VTK), Heft Nr. 130, März 2006, Teil 2 zu den Ergebnissen in Bearbeitung
- Zeitungsartikel „Aus Abwasser wird Nutzwasser“, Autor Martin Holzapfel, in der Zeitung Zermatt Inside, Heft Nr. 2, April 2006, 4. Jahrgang
- Präsentation des Projektes am Tag der offenen Tür der Eawag auf dem Info-Stand „Moderne Kleinkläranlagen“, September, 2006
- Präsentation des Projektes auf der Umweltmesse „Umwelt 06“ in Zürich, Stand der Firma terraLink, September, 2006
- Fachbeitrag im Jahresbericht der Eawag für 2007

## 10 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Umstellung der Toilettenanlage auf Hohtälli von einer Trocken-WC-Anlage hin zu einer Spültoilettenanlage, welche auf Wasserrecycling basiert, offenbarte in der ersten Betriebsaison 2004/2005 erhebliche Mängel bezüglich Qualität des gereinigten Toilettenabwassers als auch zum allgemeinen Betrieb (Wiederverwendung des Abwassers).

Durch die intensive Betreuung der Anlage in der zweiten Betriebssaison 2005/2006 konnten alle zentralen Gesichtspunkte für einen optimalen Betrieb dieser Anlage umgesetzt werden (vgl. Erfolgskriterien, Abschnitt 8).

Neben der überraschend sehr hohen Nährstoffelimination der Kläranlage konnte im Projekt gezeigt werden, dass ein Betrieb einer Abwasserreinigungsanlage mit nahezu geschlossenem Kreislauf und zudem sehr spezifisch einseitigem Abwasser möglich ist. Die entwickelte und optimierte Verfahrenstechnik ermöglicht den dezentralen Betrieb einer vollbiologischen

Kläranlage mit angepasster Belebtschlammbiologie auch im kleinen und kompakten Massstab.

Durch die entwickelten und getesteten Massnahmen zum Betrieb der Anlagen konnte eine Referenz geschaffen werden, welche für gleiche oder ähnliche Anforderung beispielhaft sein kann. Insbesondere die Erfahrungen zur Wiederverwendung des gereinigten Abwassers können als sehr wertvoll bezeichnet werden, da sie auch auf andere Systeme in Teilen übertragen werden können (z. Bsp. Einsatz von PAK in einer Belebtschlammbiologie zur Entfärbung).

Seitens der Firma terraLink wurden der Projektverlauf und die Ergebnisse als sehr positiv bewertet und kann als Referenzprojekt dienen. Im weiteren Verlauf haben sich mittlerweile bereits neue Projekte für die Firma mit sehr ähnlichen Anforderungen und Zielen entwickelt.

Die Zermatter Bergbahnen beurteilen die Ergebnisse ebenfalls positiv, da sie durch die professionelle Unterstützung im Betriebsjahr 05/06 wesentliche Erfahrungen für einen weiteren Betrieb der Anlage erhalten haben. Zudem steht nun ein Betriebshandbuch zur Verfügung, welches den erfolgreichen Betrieb für weitere Jahre der Gesamtanlage ermöglicht

Da die Eawag in den letzten Jahren neue Handlungsschwerpunkte ihrer Forschungsaktivitäten in den Bereichen Membrantechnologie, Wasserwiederverwendung, Nährstoffrückgewinnung, dezentrale Reinigungssysteme und nachhaltiger Konzepte legt, konnten durch das Projekt wertvolle Erkenntnisse erarbeitet werden.

In einer Gesamtbetrachtung kann festgehalten werden, dass der Verlauf und die erzielten Ergebnisse im Projekt für alle beteiligten Partner als vollumfänglich erfolgreich bewertet werden können. Werden für die kommende Saison die erarbeiteten Optimierungen vor Ort technisch umgesetzt und die Empfehlungen bezüglich des Betriebes durchgeführt, kann in den kommenden Jahren weiterhin eine Kläranlage betrieben werden, die vergleichsweise geringere Kosten - insbesondere Personalkosten - generiert, einen minimalen Wasserverbrauch verursacht, einen erhöhten Komfort bezüglich Benutzung und Hygiene für die Touristen erbringt als auch die Emissionen respektive Auswirkungen der Bergstation für die Umwelt verringert.



## 11 Literatur

- Abegglen, C. (2004) „Übersicht Abwasserentsorgungssysteme in SAC-Hütten“, Teilprojekt des SAC-Projektes „vom Plumpsklo zur umweltverträglichen Abwasserentsorgung“, ETH Zürich
- Brochler, H. (2003) Projekt SAC „Hüttenabwässer, Hintergrund Abwasserentsorgungssysteme“, Büro soler + bernhard
- Buetzer, S., Joss, A. and Siegrist, H. (2006) Diploma thesis “Modelling of a decentralized toilet wastewater treatment plant with closed water circulation, Eawag, Duebendorf, Switzerland
- Gujer W., Henze M., Mono T., Van Loodsrecht M. (1999), „Activated Sludge Model No.3.“ Wat. Sci. Tech., 39(1), 183-193
- Joss, A. und Böhler, M. (2005) „Kooperations-Skizze zum geplanten Projekt „Dezentrale Reinigung und Wiederverwendung von Toilettenabwasser“, inklusiv Analyseergebnisse Labor Eawag
- Manser, R. et al., 2005. “A rapid method to quantify nitrifiers in activated sludge”, Water Research 39, 1585-1593
- Rieger L., Koch G., Kühni M., Gujer W., Siegrist H. (2001), „The EAWAG BioP-Module for Activated Sludge Model No. 3, Wat. Res., 35(16), 3887-3903
- Stein, S. (2003), „Betriebserfahrungen mit unterschiedlichen Membrantechniken ZeeWeed und VRM“, 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Membrantechnik 5, 30.09.03 - 1.10.03 in Aachen, Hrsg. T. Melin u. M. Dohmann, Beitrag A6
- Udert, K.M. (2003), „The Fate of Nitrogen and Phosphorus in Source-Separated Urine“, Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Band 16
- Wedi, D. (2004), Wirtschaftlichkeit des Membranbelebungsverfahrens, VSA-Tagung - Fortbildungskurs “Abwasserreinigung der Zukunft: Membranen - Klärschlamm - Mikroverunreinigungen, vom 21.04 - 23.04.04, Emmetten (Schweiz)