

Aus dem Institut für Biologie und
Sachunterricht und ihre Didaktik der
Universität Flensburg



Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien



Eine Modelluntersuchung zur Effektivität von Pflanzenkläranlagen in semiariden, sommerheißen Gebieten

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. phil.)
der Universität Flensburg

vorgelegt von
Ing. Abir Mohamed (M.Sc.)

Flensburg
2004

Aus dem Institut für Biologie und Sachunterricht und ihre
Didaktik der Universität Flensburg

Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien

Eine Modelluntersuchung zur Effektivität von Pflanzenkläran-
lagen in semiariden, sommerheißen Gebieten

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. phil.)
der Universität Flensburg

vorgelegt von
Ing. Abir Mohamed (M.Sc.)

Flensburg
2004

1. Gutachter: Prof. Dr.: Wilfried Probst
2. Gutachter: Prof. Dr.: Gerd Jürgen Müller
3. Auswärtiger Gutachter: Prof. Dr. Ing.: Uwe Neis

Vorwort

Auch wenn unsere Erde in politisch eigenständige Länder unterteilt ist, so ist doch das Thema „Umwelt“ über alle Staatsgrenzen hinaus von Bedeutung. Der Gedanke des Umweltschutzes findet jedoch in vielen sogenannten Entwicklungsländern noch nicht die wünschenswerte Beachtung oder er ist noch nicht hinreichend im Bewusstsein der Bevölkerung und der Politiker verankert.

Insbesondere Wasser und Abwasser spielen dabei eine hervorragende Rolle. Während Wasserressourcen grundsätzlich begrenzt sind, fehlen vor allem in ländlichen Regionen auch Kanalisation und Reinigungssysteme.

Durch ständiges Anwachsen der Bevölkerung führt dies zu zunehmenden hygienischen Problemen. Durch Ausbringen ungeklärter Abwässer auf die Felder kommt es zur Verbreitung von Krankheiten über die Nahrungskette. Kostengünstige, leicht einzurichtende und zu handhabende Reinigungssysteme, die zudem eine hohe Betriebssicherheit bieten, können Abhilfe schaffen.

Etwa bis zum 19. Jahrhundert reichte die Selbstreinigung der Gewässer aus: Mit dem Steigen des Wasserverbrauchs nahm die Abwasserlast zu und die Selbstreinigungskraft der Gewässer reichte nicht mehr aus und man begann mit dem Bau technischer Anlagen zur Abwasserreinigung.

Aus technischen Gründen und auch aus Kostengründen sind solche Anlagen nicht flächendeckend in einem Land wie Syrien - meinem Heimatland - einsetzbar.

Auf der Suche nach optimalen Lösungen für die Abwasserbehandlung kleiner Gemeinden im ländlichen Raum und im Streusiedlungsbereich bieten sich als Alternative Pflanzenkläranlagen an, die in gemäßigten Klimaten schon jahrzehntelang als eine anerkannte Lösung zur dezentralen und kostensparenden Abwasserreinigung eingesetzt werden.

Pflanzenkläranlagen sind einfach gebaut und enthalten nur wenige technische Elemente. Sie können mit lokalen Möglichkeiten finanziert, gebaut und betrieben werden.

Durch den flächendeckenden Einsatz solcher Anlagen könnte die Gesundheitssituation gerade im ländlichen Raum entscheidend verbessert werden. Allerdings liegen für warme und sommertrockene Klimate bisher in dieser Hinsicht nur wenige Erfahrungen vor.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsergebnisse möchten einen Beitrag zur Verbesserung dieser Situation leisten.

Abstract

According to GTZ information, only approximately 5 % waste water is treated worldwide. Especially in developing countries untreated waste water is responsible for an enormous burden on groundwater, fields, lakes and rivers. Besides, unsettled waste water is the cause of many diseases.

In my homeland Syria, water resources are used wrongly and uneconomically. For example, agriculture claims the biggest share of freshwater which is about 87%. In addition, untreated waste water is used for irrigation too. Thus the food, in particular that which is eaten uncooked, is directly in contact with pathogen. Diseases like typhoid fever and, in particular, many worm diseases cause not only personal harm but also bring enormous economic disadvantages. These diseases cost the state treasuries enormous sums. The high rate of population growth and economic conditions in Syria play a major role in the lack of experience in water supply and waste water disposal.

In the areas near the large cities such as *ALEPPO*, *HAMA*, *HOMS* and *DAMASCUS* are located numerous rurally scattered settlements. While waste water in these four cities are treated by central technical sewage treatment plants, the waste water disposal for the rural area is a huge problem and needs a special requirement solution from the government. Here the natural decentralized waste water treatment plants like reed bed plants could be a suitable solution.

Since Syria is characterised by scarcity of capital, the simple, economical and decentralized technology for the waste water treatment has created interest.

The output questions of this project were the following:

- Is it possible to transfer and to realise a wastewater treatment plant using reed bed systems, which were developed and computed for the European and/or German areas, directly on a Mediterranean climate, for example, in Syria?

- Is a conversion realizable and will it find acceptance in the population and the responsible national administrations?
- Are wastewater treatment plants using reed bed systems actually a durable, operator-safe and economical alternative for waste water treatment in the rural areas of Syria?

Because there were no wastewater treatment plants using reed bed systems in Syria, the practical part of this thesis was: to analyse, to study, to design and to realise this system in local rural areas in Syria.

Planning began in the year 1997. The first difficult task was to convince the Syrian authorities responsible of the importance of this experiment and to obtain their approval. In particular, it was very important to clarify to the authorities and citizens the effects on environment and health situation by using untreated waste water for irrigation, the necessity for the waste water treatment and the advantages of this pilot project.

When the provisional approval was given, a suitable building site had to be found within the rural areas of Syria. Twenty-five places in the province of *DAMASCUS County* were visited and tested. Finally, a suitable place was found i.e. *HARAN AL-AWAMIED*, ca. 40 km southeast from *DAMASCUS*. This place fulfilled all the criteria such as disposal channels, waste water quantity and enough room for building and expanding.

The next difficult task was to finance the building of the treatment plant projected. Partial contributions came from several sides, such that it finally turned out as a co-operation project.

At first, *HARAN AL-AWAMIED* had made the building site available free of charge. Then a request was placed with the GTZ to take over part of the material costs of building the test treatment plant in the context of special financing.

The request was approved in 1998. After the approval of the request and with part of the costs guaranteed, the Syrian government was also

ready to take over some of the construction costs and later the personnel and operating costs. Additionally, the German Embassy in Damascus made an additional contribution for the sludge treatment part of this test plant.

The last difficult task was the building. On the one hand, the building implementation did not have any experience while, on the other hand, different materials, especially kinds of sand and gravel, had to be experimented with during the construction.

Construction began in 1999. The plant was finished in the year 2000 and dedicated officially. The wastewater treatment station in *HARAN ALAWAMIED* is a vertical flow bed system for about 300 m³/d housing wastewater.

For the technical operation: it was important to find out the correct relationship between the filling quantity and the kind of filling. After several experiments and also after the reed had grown well, the treatment plant finally reached an efficiency of elimination of the organic carbon compounds to approximately 85% and the elimination of phosphates up to 86%. The most important result, however, was the decrease of the pathogen germs, almost reaching drinking water quality.

The scientific observation of the wastewater treatment plant covered one period of three years, from 2000 to 2003. The treated waste water was used for irrigation purposes and it was standardized by **SASMO**.

The waste water treated in the test plant was controlled by five Syrian ministries responsible and released for irrigation in agriculture with restricted use.

The most important practical results of the pilot project can be summarized as follows:

- The treated waste water in *HARAN AL-AWAMIED* could be used 100 per cent for irrigation. Since treated waste water still contained sufficient nitrogen and phosphate, the soils also did not need any more additional fertilizers.

- Also the building costs of the reed bed plant were clearly less than other comparable clarifying systems.
- This kind of plant work completely autonomously and the treated waste water could be used directly at location. The residents have therefore even a great interest in the good functioning of the plant. This is different from other cases in Syria, where the waste water travelled long ways to the central technical treatment plant, leading farmers to break the pipes very often so as to use untreated waste water for irrigation.
- Another important result was the construction co-operation between the most diverse participants in financing the building and afterwards in operating the plant, which worked well notwithstanding the enormous initial difficulties and resistances.

The building and the operating of the test reed bed plant in *HARAN AL-AWAMIED* opened the gates for new methods of waste water treatment in my homeland. At present in Syria, the reed bed plants are considered to be at the centre of serious public discussions and their possible uses in the rural areas, in scattered housing estates and in particular, isolated smaller localities. The most convincing reasons for the reed bed plants are that they are low cost, are easy to build and simple to maintain in operation.

This work will expand my experience, which will be used in the future to build new stations in Syria and in the Middle East region as well as in countries with similar climates. This will really be a constructional contribution to the solution of the water crisis and to environmental protection in this burning area.

We have a responsibility to protect our environment. We should combine our contributions with those of politicians and fellow-citizens.

Zusammenfassung

Nach GTZ- Informationen werden weltweit nur ungefähr 5 % der Abwässer gereinigt. Ungeklärtes Abwasser stellt vor allem in Entwicklungsländern eine enorme Belastung des Grundwassers, der Seen und Flüsse und der Ackerbauflächen dar. Zudem ist es die Ursache vieler Krankheiten.

In Syrien werden über zwei Drittel des Süßwasservorkommens in der Landwirtschaft zur Bewässerung der Felder genutzt. Zugleich wird ungeklärtes Abwasser traditionell zur Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzt. Damit kommen Nahrungsmittel - auch solche, die ungekocht gegessen werden - mit pathogenen Keimen in Kontakt. Die dadurch bedingte hohe Rate an Infektionskrankheiten wie Typhus, Hepatitis und Wurmkrankheiten ist nicht nur mit großem persönlichen Leid verbunden, sie verursacht auch hohen volkswirtschaftlichen Schaden.

Bei den Überlegungen zur Verbesserung der Abwasserbehandlung muss auch die Siedlungsstruktur Syriens beachtet werden. Den wenigen großen Städten wie *ALEPPO*, *HAMA*, *HOMS* und *DAMASKUS* stehen zahlreiche kleine Dörfer und verstreute Siedlungen im ländlichen Bereich gegenüber. Während diese vier Städte durch zentrale technische Abwasserkläranlagen bedient werden können, stellt die Abwasserentsorgung für den Rest des Landes und insbesondere für den ländlichen Raum ein großes Problem dar. Hier kann nur eine dezentrale Abwasserreinigung Abhilfe schaffen.

Da in Syrien große Kapitalknappheit herrscht, ist das Interesse an kostengünstigen, technologisch einfachen und dezentralen Verfahren zur Abwasserreinigung groß. Dies war der Ausgangspunkt für die Fragestellungen der vorliegenden Dissertation:

- Lassen sich Pflanzenkläranlagen, die für den europäischen bzw. deutschen Raum entwickelt und berechnet wurden, direkt auf ein mediterranes Klima wie es zum Beispiel in Syrien herrscht, übertragen?

- Funktionieren sie dort so, wie sie in Europa gebaut werden oder bedürfen sie einer Modifikation in Bezug auf Planung, Ausführung, Betrieb und Nachbetreuung?
- Findet die Einrichtung von Pflanzenkläranlagen Akzeptanz in der Bevölkerung und bei den zuständigen staatlichen Verwaltungen?
- Sind Pflanzenkläranlagen eine dauerhaft funktionssichere und kostengünstige Möglichkeit für die Abwasserreinigung in den ländlichen Gebieten Syriens?

Da es bisher in Syrien keine Pflanzenkläranlage gab, bestand der praktische Teil dieser Untersuchung darin, vor Ort selbst eine Versuchsanlage zu bauen.

Die Planungen dafür begannen im Jahre 1997. Die erste schwierige Aufgabe bestand darin, die zuständigen syrischen Behörden von der Wichtigkeit dieses Experiments zu überzeugen und eine Genehmigung zu erwirken. Da insbesondere das Umwelt- und Hygienebewusstsein bei Behörden und Bürgern noch nicht so ausgeprägt war, musste dort zunächst Überzeugungsarbeit geleistet werden.

Als die vorläufige Zustimmung seitens der Behörden vorlag, musste innerhalb der ländlichen Gebiete Syriens der richtige Bauplatz gefunden werden. Hierfür wurden innerhalb der Provinz *DAMASKUS-Land (RIF DIMASHQ - Provinz)* insgesamt 25 Orte besucht und getestet. Schließlich wurde der passende Platz in der Ortschaft *HARAN AL-AWAMIED* etwa 40 km südöstlich von *DAMASKUS* gefunden. Hier waren die erforderlichen Voraussetzungen wie ein vorhandenes Abwasserkanalnetz, ein ausreichendes aber auch nicht zu hohes Abwasseraufkommen und ein geeigneter Bauplatz erfüllt.

Die nächste schwierige Aufgabe bestand in der Sicherung der Finanzierung. Dies gelang schließlich durch die Kooperation verschiedener Institutionen:

Als erstes stellte die Gemeinde *HARAN AL-AWAMIED* den Bauplatz kostenlos zur Verfügung. Dann wurde ein Antrag an die GTZ gestellt, einen Teil der Materialkosten zum Bau der Versuchskläranlage im Rahmen einer Sachfinanzierung zu übernehmen. Der Antrag wurde im

Jahre 1998 genehmigt. Nach der Genehmigung des Antrags und der dadurch sichergestellten Übernahme eines Teils der Kosten war auch die syrische Regierung bereit, die Baukosten und die späteren Personal- und Betriebskosten zu übernehmen. Die deutsche Botschaft in *DAMASKUS* trug zusätzlich mit einem Sonderbeitrag zum Bau der Anlage bei.

Nach diesen Vorarbeiten wurde 1999 mit dem Bau der Anlage begonnen. Da die Bauausführenden hiermit keinerlei Erfahrung hatten, war eine intensive Betreuung notwendig. Zudem musste schon während des Baus mit verschiedenen Materialien experimentiert werden, was ebenfalls eine ständige Präsenz bei den Bauarbeiten vor Ort erforderte. Die Anlage wurde im Jahre 2000 fertiggestellt und offiziell eingeweiht. Für die Testanlage in *HARAN AL-AWAMIED* wurde der Anlagentyp mit vertikaler Durchströmung der Pflanzbeete gewählt.

Was die betriebstechnischen Ergebnisse angeht, so war es das dringlichste Problem, das richtige Verhältnis zwischen Beschickungsmenge und Beschickungsart herauszufinden. Nachdem dies durch mehrere Experimente vorlag und nachdem auch das Schilf gut gewachsen war, erreichte die Pflanzenkläranlage schließlich bei der Elimination der organischen Kohlenstoffverbindungen einen Wirkungsgrad von etwa 85% und bei der Elimination der Phosphate einen Wirkungsgrad von etwa 86%. Das wichtigste Ergebnis aber war, dass die Zahl der pathogenen Keime in hohem Maße, nahezu bis an die Grenze von Trinkwasserqualität, vermindert werden konnte.

Die wissenschaftliche Beobachtung der Pflanzenkläranlage umfasste einen Zeitraum, von November 2000 bis April 2003. Für die Beurteilung dienten die von **SASMO** festgelegten Standardwerte für gereinigtes Abwasser für Bewässerungszwecke als Grundlage.

Außerdem wurde das in der Versuchspflanzenkläranlage gereinigte Abwasser durch fünf dafür zuständige syrische Ministerien kontrolliert und von diesen für die Bewässerung in der Landwirtschaft freigegeben.

Die wichtigsten praktischen Ergebnisse des Pilotprojekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das gereinigte Abwasser der Versuchsanlage in *HARAN AL-AWAMIED* kann zu 100 Prozent in der Landwirtschaft der Gemeinde zur Bewässerung der Felder genutzt werden. Da das gereinigte Abwasser Restmengen an Stickstoff und Phosphat enthält, benötigen die Böden auch keine zusätzlichen Düngemittel.
- Die Herstellungskosten der Pflanzenkläranlage lagen deutlich unter denen vergleichbarer anderer Klärsysteme.
- Die Anlage arbeitet völlig autonom und mit einheimischem Personal und das gereinigte Abwasser kann direkt vor Ort genutzt werden. Die Anwohner haben deshalb selbst ein großes Interesse am guten Funktionieren der Anlage.
- Größte Schwierigkeiten machte es, die anfänglich enormen Widerstände der verschiedensten an Planung, Bau und Betrieb des Projekts beteiligten Parteien zu überwinden und eine konstruktive Zusammenarbeit zu erreichen.

Der Bau und Betrieb dieser Versuchs-Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* hat in meiner Heimat ein Tor zu neuen Methoden der Abwasserreinigung geöffnet. Zur Zeit stehen die Pflanzenkläranlagen in Syrien im Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion. Ihr Einsatz für Abwasserreinigung, insbesondere in ländlichen Gebieten, in Streusiedlungen, in isoliert liegenden Neubaugebieten oder in kleineren Ortschaften wird ernsthaft erwogen. Dabei überzeugt am meisten, dass Pflanzenkläranlagen wenig kosten, leicht zu bauen und einfach in Betrieb zu halten sind.

Diese neue Technologie kann ein konstruktiver Beitrag zur Lösung der Wasserkrise in Syrien und auch in anderen Ländern des Nahen Ostens sein. Ihre Anwendung wäre ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Umweltsituation.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Abstract	6
Zusammenfassung	10
Glossar	17
Verzeichnis der Abbildungen.....	18
Verzeichnis der Tabellen.....	19
1. Einleitung	20
1.1 Problemstellung.....	20
1.2 Ziele	21
2. Allgemeine Grundlagen der Abwasserbehandlung	23
2.1 Zusammensetzung und Mengen des Abwassers.....	23
2.2 Abwasser - Parameter	24
2.2.1 Physikalische Eigenschaften.....	24
2.2.2 pH-Wert.....	24
2.2.3 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB).....	25
2.2.4 Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB ₅).....	25
2.2.5 Organischer Kohlenstoff.....	26
2.2.6 Stickstoff.....	26
2.2.7 Phosphor.....	26
2.2.8 Hygienische Eigenschaften.....	27
2.2.9 Schwermetalle und Gifte	27
2.3 Entsorgungsverfahren.....	27
2.3.1 Mischverfahren.....	27
2.3.2 Trennverfahren.....	27
2.4 Reinigungsverfahren	28
2.4.1 Mechanische Verfahren.....	28
2.4.2 Chemische Verfahren.....	30
2.4.3 Biologische Verfahren.....	30
2.4.4 Naturnahe Verfahren	32
2.5 Klärschlammbehandlung	33
2.5.1 Schlammstabilisierung	34
2.5.2 Schlammentwässerung	34
2.5.3 Schlammabeseitigung	34
3. Pflanzenkläranlagen.....	35
3.1 Aufbau von Pflanzenkläranlagen.....	36
3.2 Typen von Pflanzenkläranlagen.....	37
3.3 Geeignete Pflanzen	39
3.4 Biochemische Vorgänge im Pflanzenbeet.....	41
3.5 Vor- und Nachteile von Pflanzenkläranlagen.....	44
4. Zur Situation der Abwasserreinigung in Syrien.....	46
4.1 Nutzung und Verfügbarkeit von Wasser in Syrien.....	48
4.2 Probleme	49
4.3 Politische Konsequenzen	52
4.4 Zentrale oder dezentrale Kläranlagen?	54
5. Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien.....	57
5.1 Planung.....	57
5.1.1 Entscheidungskriterien für eine Pflanzenkläranlage.....	58
5.1.2 Auswahl des Standortes.....	59
5.1.4 Vorüberlegungen für den Bau der Anlage in <i>HARAN AL-AWAMIED</i>	62

5.2	Bestandteile der Anlage	66
5.2.1	Mechanische Vorreinigung	66
5.2.2	Biologische Reinigung, Pflanzbeete	70
5.3	Durchführung des Betriebs	77
5.4	Kosten	80
5.4.1	Herstellungskosten	80
5.4.2	Betriebskosten	83
5.5	Materialien und Methoden	84
5.5.1	Abwasser-Untersuchungen an den Pflanzbeeten	84
5.5.2	Geräte und Materialien	87
6.	Ergebnisse und Diskussion	88
6.1	Ergebnisse, Auswertung und Diskussion der Reinigungsleistung in der Untersuchungsperiode	89
6.1.1	Temperatur	89
6.1.2	pH-Wert	89
6.1.3	Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) und Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB ₅)	90
6.1.4	Ammonium	92
6.1.5	Nitrit	94
6.1.6	Nitrat	94
6.1.7	Phospat	96
6.1.8	Schwermetalle	96
6.1.9	Entfernung von Krankheitserregern	97
6.1.10	Bodenanalyse des bewässerten Ackerbodens	98
6.2	Politische und ökonomische Betrachtungen über die Einrichtung von Pflanzenkläranlagen in Syrien	101
6.2.1	Der politisch-soziologische Aspekt	101
6.2.2	Der ökonomische Aspekt	102
6.3	Baumaterial und Betrieb der Pflanzenkläranlage in <i>HARAN AL- AWAMIED</i>	107
6.3.1	Baumaterial	107
6.3.2	Anlage und Größe der Beete	107
6.3.3	Bepflanzung der Beete	108
6.3.4	Vorreinigungsstufe und Funktionsdauer der Anlage	109
6.3.5	Klärschlamm Entsorgung	109
6.3.6	Laboruntersuchungen	109
6.3.7	Gestaltung der Außenanlagen in <i>HARAN AL-AWAMIED</i>	110
6.4	Erfahrungen hinsichtlich des Personals	110
6.5	Erfahrungen hinsichtlich der Akzeptanz durch die Gemeinde und die zuständigen Abwasserbehörden	111
6.6	Besonderer Nutzen von Pflanzenkläranlagen für Syrien	112
6.7	Zur Realisierung und Funktion von Pflanzenkläranlagen in entsprechenden Klimazonen	114
7.	Offene Fragen, zukünftige Forschungsaufgaben, Möglichkeiten der Übertragbarkeit	116
7.1	Bautechnische Komponente	116
7.2	Betriebstechnische Komponente	118
7.3	Soziale Komponente	119
7.4	Politische und umweltpolitische Komponente	120
7.5	Gesundheitlich-hygienische Komponente	120
7.6	Nachhaltigkeit	121

7.7 Fazit.....	122
8.Literaturverzeichnis.....	123
9.Anhang.....	127

Glossar

a	Jahr
Abb.	Abbildung
AOAD	Arab Organization for Agricultural Development
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
BSB₅	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
CW	Constructed Wetland (Pflanzenkläranlagen)
d	Tag
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
EW	Einwohner
GFA	Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik
GTZ	Gesellschaft für technischer Zusammenarbeit
h	Stunde
K_f- Wert	Durchlässigkeitsbeiwert m/s
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
Lf.m	Laufende Meter
n.a.	nicht angegeben
NH₃	Ammoniak
NH₄-N	Ammonium-Stickstoff
NO₂-N	Nitrit-Stickstoff
NO₃-N	Nitrat-Stickstoff
p.p.m	Parts per Million = mg/l oder g/m ³
Q_d	Abwassermenge m ³ /d
SASMO	Syrian Arab Organization for Standardization and Metrology
SP	Syrische Pfund (1 Euro ist etwa 60 Syrische Pfund)
S.S.	Absetzbare Stoffe (Suspended Solid)
T	Tonne = 1000 kg
T.D.S	Total Dissolved Solids
V_s	Sinkgeschwindigkeit m/h

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1	Wasserräder in HAMA, Syrien	18
Abb. 2	Schematischer Standardaufbau eines Horizontalfilters und Strömungsrichtung	34
Abb. 3	Schematischer Standardaufbau eines Vertikalfilters und Strömungsrichtung	35
Abb. 4	Sauerstoffbilanz für ein mit Schilf bepflanztes Klärschlamm-trockenbeet	37
Abb. 5	Übersichtskarte des Nahen Ostens	43
Abb. 6	Bevölkerungsdichte in Syrien und verteilte Bassins	44
Abb. 7	Anteile der Wassernutzung in Syrien	45
Abb. 8	Absichtlich hergestellter Bruch im Abwasserentsorgungskanal	53
Abb. 9	Die Lage der Ortschaft <i>HARAN AL-AWAMIED</i>	56
Abb. 10	Klimadiagramm in <i>HARAN AL-AWAMIED</i>	57
Abb. 11	Bauplan der Anlage	63
Abb. 12	Pflanzbeete	68
Abb. 13	Filterschichten im Pflanzbeet	70
Abb. 14	Körnungslinie des genutzten Sandes	71
Abb. 15	Schlammbehandlungsbeet nach 5 Monaten	74
Abb. 16	Abwassertemperatur in Zu- und Ablauf und passender Bereich für die Mikroorganismen	86
Abb. 17	pH-Werte in Zu- und Ablauf und optimaler Bereich für die Mikroorganismen	87
Abb. 18	CSB in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie	88
Abb. 19	BSB ₅ in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie	89
Abb. 20	Ammonium in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie	90
Abb. 21	Nitrit in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie	91
Abb. 22	Nitrat in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie	92
Abb. 23	Phosphat in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie	93
Abb. 24	Die Schilfbeete nach der Einweihung	96
Abb. 25	Ein Schilfbeet nach drei Jahren	97
Abb. 26	Das Schlammbehandlungsbeet nach drei Jahren	97
Abb. 27	Parallele und serielle Anordnung von Pflanzbeeten	113

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Verfahren zur Eliminierung der Feststoffe	25
Tabelle 2	Zahl der Mikroorganismen in einem bepflanzten und einem wurzelfreien Boden	33
Tabelle 3	Wasserverfügbarkeit und Wasserverbrauch in den sieben Bassins Syriens	46
Tabelle 4	Abwassersituation in Syrien	48
Tabelle 5	Die Auswirkung auf den Wasserverbrauch durch verschiedene Einrichtungen des Ortes	58
Tabelle 6	Richtlinie der geklärten Abwassernutzung in der Landwirtschaft	61
Tabelle 7	Werte der Abwasseranalyse in <i>HARAN AL-AWAMIED</i>	62
Tabelle 8	Untersuchung des verwendeten Sandes	71
Tabelle 9	Beschickungsschema	77
Tabelle 10	Finanzierung durch die GTZ	78
Tabelle 11	Förderung durch das Land Syrien	79
Tabelle 12	Förderung durch die deutsche Botschaft in <i>DAMASKUS</i>	80
Tabelle 13	Betriebskosten	81
Tabelle 14	Geräte und Materialien	84
Tabelle 15	Metall- und Cyanid-Konzentrationen am 11.08.2002	94
Tabelle 16	Pathogene Keime des gereinigten Abwassers	94
Tabelle 17	Bodenanalyse in <i>HARAN AL-AWAMIED</i>	95
Tabelle 18	Kosten einer Kläranlage mit 50 m ³ /d und etwa 625 Einwohnern	100
Tabelle 19	Kosten einer Kläranlage mit 500 m ³ /d und etwa 6250 Einwohnern	101
Tabelle 20	Herstellungs- und Betriebskosten der Kläranlage in <i>SALAMIEH</i>	103

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Der größte Teil der Erdoberfläche ist von Wasser bedeckt, aber es ist Salzwasser. Meerwasser kann zwar technisch entsalzt werden, doch sind die Herstellungskosten für solche Meerwasserentsalzungsanlagen sehr hoch. Darüber hinaus ist der Entsalzungsprozess mit einem hohen Energieumsatz verbunden und schließlich sind die Kosten der Wasserverteilung bis zum Verbraucher nicht zu vernachlässigen, insbesondere wenn es um nicht küstennahe Gebiete geht. Damit stellt diese Möglichkeit für die meisten Länder keine reale Perspektive dar.

In diesen Ländern ist man deshalb auf Süßwasser angewiesen. Doch dieses Süßwasser ist auf der Erde sehr ungleich verteilt. Die Menge des Wasserverbrauchs nimmt mit dem starken Wachstum der Erdbevölkerung rapide zu. Auf dem Johannesburg - Gipfel 2002 wurde berichtet: Von den 4,6 Milliarden Einwohnern der Entwicklungsländer haben mehr als eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu sauberem Wasser und etwa 2,4 Milliarden Menschen haben keinen Zugang zu grundlegender Abwasserentsorgung. Im 20. Jahrhundert wurden Kriege um Öl geführt. Bei den hoffentlich nicht stattfindenden Kriegen des 21. Jahrhunderts könnte es sicherlich auch um Wasser gehen, das deutet sich leider jetzt schon mancherorts an.

Heute ist der Nahe Osten eine der bekanntesten Zonen mit Wasserknappheit. Die Ursachen dafür sind einmal das Klima (Wüstenklima mit sehr geringen Niederschlägen), zum anderen der zunehmende Wasserverbrauch, der vorwiegend durch das enorme Bevölkerungswachstum zu Stande kommt. Dies führt schon seit Jahrzehnten zu einem sinkenden Grundwasserspiegel. Die Folgen sind nicht nur direkter Trinkwassermangel. Auch für die Landwirtschaft, die angesichts des steigenden Nahrungsmittelbedarfs ständig intensiviert werden sollte, fehlt das nötige Wasser. Dies gilt einmal für die Bewässerung, zum anderen aber auch für die Produktion von Kunstdünger, die mit Wasserverbrauch verbunden ist.

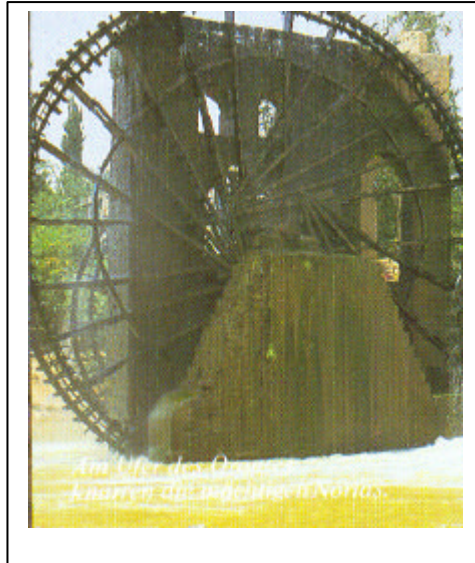


Abb. 1: Wasserrad in HAMA, Syrien (Tourismusministerium, Syrien: Erlebnis Syrien, Broschüre für die Expo2000 in Hannover).

Viele hundert Jahre drehten sich die riesigen Wasserräder: Schaufel um Schaufel hoben sie das ALASIE-Flusswasser¹ in die Bewässerungskanäle. Zurzeit drehen sich die Räder nur noch selten. Diese Situation in HAMA spiegelt den Wassermangel in ganz Syrien wider.

Wasser ist die Quelle des Lebens. Schon immer hat Wasser auf unserer Erde eine ganz entscheidende Rolle gespielt, und immer wo es Wasser gab, entwickelten sich Kulturen. Mit einer stark wachsenden Bevölkerung in den Entwicklungsländern und einer stark wachsenden Industrialisierung in den westlichen Ländern wird es aber immer schwieriger, Wasserquellen zu erschließen oder für das Abwasser entsprechende Reinigungsverfahren zu finden.

In vielen Entwicklungsländern besteht zwischen Stadt und Land, insbesondere im Bereich der Energieversorgung, Wasserversorgung und Abwasserentsorgung ein erhebliches Entwicklungsgefälle. Für diese Länder sind bis heute die Verfahren zur Reinigung von Abwasser zu arbeitsaufwändig und zu teuer, deswegen brauchen wir für die Abwasserreinigung im ländlichen Bereich eine Lösung mit finanzieller und technischer Perspektive.

1.2 Ziele

In dieser Arbeit soll untersucht werden,

1. ob und in welchem Umfang Pflanzenkläranlagen in semiariden Gebieten zur Klärung von Abwasser eingesetzt werden können,
2. ob sich dadurch Kosten einsparen lassen und

¹ Ein Fluss im Westen des Landes, der im Libanon entspringt und der in der Antike ORONTES genannt wurde.

3. ob das gereinigte Abwasser für die Bewässerung von Ackerböden genutzt werden kann, um die Grundwasserreserven zu schonen.

In diese Arbeit fließen auch alle durch die praktische Umsetzung gewonnenen subjektiven Erfahrungen mit ein. Sie resultieren aus der Planung, dem Bau und der Inbetriebnahme der Modell-Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* (einem Dorf in der Nähe der syrischen Hauptstadt *DAMASKUS*). Es geht also nicht nur um eine Auswertung von Messdaten des nun etwa dreijährigen Betriebes, sondern auch um die Erfahrungen, die sich aus den sozioökonomischen Rahmenbedingungen und aus den weiteren Voraussetzungen einer erfolgreichen Implementation von Pflanzenkläranlagen ergaben. Die Einbeziehung des sozialen Umfelds ist für das Projekt von besonderer Bedeutung, da die Akzeptanz nicht nur bei den Regierungsstellen, sondern insbesondere in der Bevölkerung entscheidend für einen zukünftigen und dauerhaften Erfolg sein wird.

Die vorliegende Arbeit soll damit wichtige Erfahrungen und Daten liefern, die nicht nur für den Bau weiterer entsprechender Anlagen in Syrien eingesetzt werden können, sondern die auch für die gesamte Nahost-Region sowie für Länder in ähnlichen Klimazonen eine wichtige Anwendungsgrundlage bilden können.

Um zu erfahren, ob Pflanzenkläranlagen für trockene und semiaride Klimate geeignet sind und ob sie von der Bevölkerung akzeptiert werden, wurde unter meiner Leitung die oben bezeichnete Pflanzenkläranlage gebaut und drei Jahre untersucht.

2. Allgemeine Grundlagen der Abwasserbehandlung²

Abwasser ist durch Gebrauch verändertes abfließendes Wasser. Man spricht auch von Schmutzwasser. Zu solchem gehören häusliche Abwässer, wie Bade-, Spül-, Wasch- und Fäkalabwasser, sowie gewerbliches und industrielles Abwasser. Zum Abwasser gehört aber auch mehr oder weniger sauberes Regenwasser, wenn es gemeinsam mit dem Schmutzwasser in einer Mischkanalisation abgeführt wird (*Bischoff, W., 1993, S. 1*).

Alle Methoden der Abwasserbehandlung streben die Reinigung des Wassers durch die Umwandlung der Schmutzstoffe, wie Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorverbindungen sowie die Entfernung von Keimen und Schwermetallen an. Die dabei verwendeten Methoden sollen das Abwasser so weit reinigen, dass es ohne Schaden entweder in den natürlichen Wasserkreislauf zurückgeführt oder in der Landwirtschaft für Bewässerung genutzt werden kann. Auch die Verbreitung von pathogenen Keimen soll verhindert werden. Schließlich soll die Abgabe von klimabeeinflussenden Gasen reduziert werden und damit sollen gleichzeitig Geruchsprobleme vermieden werden. Gelingt dies, so kann der Verbrauch von Grundwasser erheblich reduziert werden.

2.1 Zusammensetzung und Mengen des Abwassers

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Abwassers hängen von sozialen, ökologischen und klimatischen Umständen ab. Unterschiede des Abwassers ergeben sich aber auch an gleichen Orten durch unterschiedliche Zeitrhythmen und durch die Art des Kanalisationssystems, je nachdem, ob es sich um eine Trenn- oder Mischkanalisation handelt.

Die Menge des Abwassers hängt von dem Wasserverbrauch der Bevölkerung ab, was viel mit dem Lebensstandard und dem ökologischen

² In Kapitel 2 stützt sich auf die Standardliteratur, insbesondere: Bischoff, W., 1993, Imhoff's, K., 1989, Mudrack, K. und Kunst, S., 2003 und Kunz, P. 1995

Standard zu tun hat. Der Wasserverbrauch ist aber auch - insbesondere in Entwicklungsländern - von Land zu Land und auch zwischen städtischen und ländlichen Bereichen verschieden (*Imhoff's, K., 1989, S. 88 und Wissing, F., 1995, S. 10*). Die Beschaffenheit des Abwassers hängt sehr stark von seiner Herkunft ab. So ist zu unterscheiden, ob es sich um kommunales (häusliches) Abwasser handelt oder um Industrieabwässer. Aber auch die Tageszeit und die Jahreszeit können für die Abwasserqualität entscheidend sein.

2.2 Abwasser - Parameter

Das Abwasser besteht zu etwa 99% aus Wasser. Hinzu kommen organische und anorganische Substanzen, Viren und Mikroorganismen.

Abwasserparameter geben Aufschluss über die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Abwassers. Damit liefern sie repräsentative Informationen über die durch die Nutzung erfolgte Veränderung der Wasserbeschaffenheit und lassen sowohl eine Beurteilung der Reinigungsmöglichkeiten wie auch die Überprüfung der Qualität des Abwassers nach der Reinigung zu. Um einen zutreffenden Überblick über die Zusammensetzung des Abwassers zu erhalten, wird eine 24-Stunden-Mischprobe untersucht.

2.2.1 Physikalische Eigenschaften

Unter physikalischen Eigenschaften versteht man die Temperatur des Abwassers und seinen Gehalt an absetzbaren organischen oder anorganischen Stoffen.

2.2.2 pH-Wert

Der pH-Wert beschreibt die Aktivität der Wasserstoffionen in einer wässrigen Lösung auf einer Skala von 0 bis 14. Auf dieser Skala werden Flüssigkeiten als sauer, basisch oder neutral bezeichnet.

Bei der Abwasserreinigung ist der pH-Wert das erste wichtige chemische Kriterium. Ein pH-Wert über 8 oder unter 6,5 zeigt, dass das Abwasser mit Laugen oder Säuren belastet ist (*Industrielle Abwässer*). Die biologische Abwasserreinigung mittels Mikroorganismen muss zumeist

im Bereich pH 6-9 erfolgen, da außerhalb dieses Bereichs die meisten Mikroorganismen geschädigt oder nicht aktiv werden. Aus diesem Grund ist es wichtig vor der biologischen Stufe bei entsprechenden Industrieanlagen zunächst eine Untersuchung des pH-Wertes vorzunehmen, um gegebenenfalls durch eine chemische pH-Wert-Regulierung den o.g. Bereich des pH-Wertes zu erreichen.

2.2.3 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

Ohne Sauerstoff oxidieren die Schmutzstoffe nicht, das heißt, dass der biologische Reinigungsprozess nicht erfolgen kann. Der BSB-Wert nennt die Sauerstoffmenge (O_2) in mg/l, die notwendig ist, um die organischen Stoffe des Abwassers mit Hilfe von Bakterien abzubauen. Dieser Wert wird als Maßstab für die Verschmutzung des Abwassers mit organischen Stoffen benutzt.

Ohne künstliche Intensivierung verteilt sich dieser Sauerstoffbedarf und damit die Reinigung über etwa 25 Tage. Die Abnahme des BSB an einem Tag beträgt bei $t = 20\text{ °C}$ etwa 20,6% des Restbedarfs. Bei niedrigen Temperaturen verläuft der Abbau langsamer, bei höheren Temperaturen schneller.

Zum Vergleich verschiedenen Abwassers benutzt man den biologischen Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen, den BSB_5 . Er beträgt 68,4% des Gesamt-BSB. Der BSB_5 gilt als Maß für die Konzentration an fäulnisfähigen organischen Substanzen. Repräsentative Messungen haben ergeben, dass heute je Einwohner im Mittel 60 g BSB_5 je Tag in das Abwasser abgegeben werden (*Bischof, W. 1993, S. 291 - 292*). In Ländern mit niedrigem Lebensstandard sind die Werte geringer.

2.2.4 Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB_5)

Der BSB_5 reicht für die Beschreibung der Eigenschaften des Abwassers nicht aus, weil er die biologisch nicht abbaubaren Stoffe unberücksichtigt lässt. Aus diesem Grund ergänzt man die Aussage über den Gehalt an organischen und anorganischen Stoffen durch die Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs CSB. Zu dessen Ermittlung wird eine Totaloxidation der oxidierbaren Inhaltsstoffe mit starken Oxidationsmit-

tern vorgenommen. Deswegen ist der CSB-Wert stets größer als der BSB₅-Wert.

Die CSB-Ermittlung führt man bei einer Temperatur von 149 °C durch. Als Oxidationsmittel werden Kaliumpermanganat (KMnO₄) oder Kaliumdichromat (K₂Cr₂O₇) verwendet. Man erhält die Ergebnisse nach etwa drei Stunden. Eine Unterscheidung zwischen biologisch abbaubaren und biologisch nicht abbaubaren Stoffen ist hierbei nicht möglich.

2.2.5 Organischer Kohlenstoff

Er zeigt den Anteil an organischen Substanzen entweder als Gesamtkohlenstoff (TOC) oder als gelösten Kohlenstoff (DOC). Dieser Parameter unterscheidet aber nicht zwischen abbaubaren und nicht abbaubaren Substanzen.

2.2.6 Stickstoff

Stickstoff kann im Abwasser in unterschiedlicher Form vorliegen. Im Rohabwasser ist organischer Stickstoff als Harnstoff oder bei beginnenden Abbauprozessen als Ammoniak vorhanden. Nitrit- und Nitratstickstoff sind im Abwasser in unterschiedlichen Konzentrationen zu finden.

2.2.7 Phosphor

Der größte Teil des Gesamtphosphors liegt im Abwasser in anorganischer gelöster Form vor, ein geringer Teil in organischer gelöster und nicht gelöster Form. Phosphor kommt vor allem über Fäkalien sowie über Waschmittel in das Abwasser. Der Phosphorgehalt spielt in Form des Phosphats eine große Rolle. Er steht mit einer Intensivierung des Algenwachstums in Verbindung. Deswegen werden für die Phosphorkonzentrationen im gereinigten Abwasser bei Einleitung in Gewässer bestimmte Grenzwerte festgelegt. Für die Nutzung von gereinigtem Abwasser in der Landwirtschaft sind die Grenzwerte wesentlich höher.

2.2.8 Hygienische Eigenschaften

Die ursprünglichen Gründe der Abwasserreinigung lagen in der Hygiene. Als Maß für die potentielle Anwesenheit pathogener Keime wird der Coli-Test durchgeführt.

In einem Liter Abwasser sind etwa eine Millionen Coli-Bakterien wie fäkalcoliforme Bakterien und Salmonellen u.a., die oft als Krankheitserreger einzustufen sind.

2.2.9 Schwermetalle und Gifte

Diese Stoffe werden auch als Schadstoffe bezeichnet. Mit zunehmender Industrialisierung steigt die Konzentration an Giftstoffen und Schwermetallen in den Abwässern an. Dies erfordert Untersuchungen, die zeigen, ob Abwasser und Schlamm nach der Behandlung für die Landwirtschaft verwendet werden können. Die Untersuchung der Schwermetalle erfasst vor allem Nickel, Cadmium, Kupfer, Zink, Blei, Quecksilber und Chrom.

2.3 Entsorgungsverfahren

Die Ableitung von Abwässern vom Entstehungsort zur Kläranlage oder zum Vorfluter bezeichnet man als Entsorgung. Grundsätzlich werden dabei zwei Verfahren unterschieden, das Misch- und das Trennverfahren.

2.3.1 Mischverfahren

Beim Mischverfahren rechnet man zur Abwassermenge auch das Regenwasser. Durch die Regenwasserzufuhr nimmt zwar die Abwassermenge zu, die Konzentration an Verunreinigungen verringert sich jedoch. Dieses Verfahren erzeugt geringere Kosten beim Leitungsbau.

2.3.2 Trennverfahren

Hier werden getrennte Anschlusskanäle für Abwasser und Regenwasser gebaut, was höhere Baukosten für das öffentliche Kanalnetz bedeutet. In Ländern mit niedrigen Niederschlagsmengen ist das Trennverfahren zu aufwändig.

2.4 Reinigungsverfahren

Die Entwicklung der Reinigungsverfahren führte zum Bau von Abwasserreinigungsanlagen mit unterschiedlichen Reinigungsmethoden. Alle diese Methoden, die für die Abwasserbehandlung verwendet werden, streben Maßnahmen zur Verbesserung und Veränderung der physikalischen, chemischen und biologischen Beschaffenheit von Abwässern an, sowie zur Wiederverwendung des gereinigten Abwassers. Diese Methoden müssen garantieren, das Abwasser zu reinigen, die Verschmutzung des Grundwassers zu schützen und Geruchsprobleme zu vermeiden. Die Wahl eines geeigneten Verfahrens hängt von mehreren Faktoren ab, so von der Art des Abwassers (Haushaltsabwasser oder industrielles Abwasser) sowie von ökonomischen und ökologischen Faktoren. Die Abwasserreinigung wird normalerweise in drei Stufen durchgeführt:

2.4.1 Mechanische Verfahren

Die mechanische Stufe soll die Feststoffe vom Abwasser trennen. Abwasser enthält ungelöste und gelöste Schmutzstoffe. Bei den ungelösten Schmutzstoffen werden Schwebstoffe, Sinkstoffe und Schwimmstoffe unterschieden. Man verwendet unterschiedliche Verfahren, um diese Feststoffe zu eliminieren. Dabei wird etwa ein Drittel der Verschmutzungsfracht entfernt.

Tabelle 1: Verfahren der Eliminierung der Feststoffe

Art des Inhaltsstoffes	Eliminierungsverfahren
Grobe Schwebstoffe	Siebe und Rechen
Sinkstoffe	Sandfänge
Fett, Öl, Schwimmstoffe	Fettfänge, Ölabscheider, Flotationsbecken
Feine Schwebstoffe	Absetzbecken, Flotationsbecken, Füllungsbecken, Sandfilter, Mikrosiebe

(Habeck-Tropfke, L. und Habeck-Tropfke, H.-H., 1992, S. 116)

Rechen: Durch Rechen werden grobe Feststoffe aus dem Abwasser entfernt. Häufig verwendet man zwei oder drei Rechen mit unterschiedlichem Stababstand hintereinander, um die meisten Grobstoffe zurückzuhalten. Diese mechanische Vorbehandlung erfolgt in allen Kläranla-

gen, um die folgenden Anlagenteile vor einer Betriebsstörung zu schützen. Das Rechengut wird entweder mechanisch oder manuell gesammelt, entwässert und anschließend deponiert oder verbrannt.

Sandfang: Sand lagert sich bei langsamem horizontalem Durchfluss des Abwassers ab. Hierzu schickt man das Abwasser durch einen langen Weg mit langsamer Durchströmungsgeschwindigkeit. Für die Anlagen mit Mischsystemen ist der Sandfang besonders wichtig, weil das Regenwasser oft Sand mit sich führt. Man unterscheidet verschiedene Sandfänge z.B. Langsandfang, Tiefsandfang, Rundsandfang und Hydrozyklon (Zentrifugalabscheider).

Flotationsbecken: Flotationsverfahren werden angewandt, um feine Schmutzpartikel und Schwebstoffe zu binden; es werden hier verschiedene Hilfsstoffe eingesetzt. Besonders für industrielles Abwasser der Schlachthöfe, Seifenfabriken, Papierfabriken usw. sind Flotationsbecken eine wichtige Stufe der Reinigung.

Absetz- oder Vorklärbecken: In Absetzbecken werden die flockigen und körnigen Bestandteile des Abwassers abgesetzt. Dabei beeinflussen viele Faktoren den Abscheidvorgang: Fließgeschwindigkeit, Aufenthaltszeit, Anteil an Schwebstoffen, Flockungseffekte, Eindickbarkeit und Temperatur.

Es werden unterschiedliche Typen von Absetzbecken gebaut: Flachbecken (Rundbecken oder Rechteckbecken), Trichterbecken und zweistöckige sowie kombinierte Absetzbecken. Der hier anfallende Schlamm wird als Primärschlamm bezeichnet. Ob ein Absetzbecken rund oder rechteckig ausgeführt wird, hat keinen Einfluss auf die Aufenthaltszeit, die normalerweise mit zwei Stunden berechnet wird.

Rundbecken werden von unten und in der Mitte angeströmt. Das Abwasser bewegt sich von dort nach oben und außen zum Ablauf. Der Beckenboden ist konisch zur Mitte geneigt. Der Schlamm wird mit Hilfe eines kontinuierlich langsam umlaufenden Rundräumers zur Mitte bewegt. Rechteckbecken werden der Länge nach horizontal durchströmt und mit Hilfe von Längsräumern gereinigt.

Absetzbecken dienen auch als Nachklärbecken, um das gereinigte Abwasser vom Belebtschlamm zu trennen und den Schlamm zu sammeln. Man rechnet solche Nachklärbecken zum biologischen Teil der Anlage.

2.4.2 Chemische Verfahren

Die Reinigungsleistung wird noch gesteigert, wenn Stoffe mit Hilfe von Chemikalien abgeschieden und entfernt werden können. Dabei werden auch gelöste Stoffe zurückgehalten, wozu man sie unter Umständen zuerst in fällbare Substanzen überführt. Insbesondere bei industriellen Abwässern setzt man chemische Verfahren ein, um folgende Ziele zu erreichen:

- Saures oder basisches Abwasser wird neutralisiert, denn ein pH-Wert von unter 6,5 führt zu einer deutlichen Verminderung der Nitrifikationsleistung und des Stoffabbaues. Bei einem pH-Wert von über 7 wandelt sich Ammonium (NH_4^+) in das giftige Ammoniak (NH_3) um.
- Entfernung von Kolloidstoffen und feinen Schmutzpartikeln durch Flockungsmittelzugabe.
- Entfernung von Phosphor durch Eisen- bzw. Aluminium-Ionen-Zugabe in verschiedenen Stufen der Reinigung wie z.B. zum Belebungsschlamm, vor dem Vorklärbecken oder vor dem Nachklärbecken.
- Entkeimung durch Chlor- oder Ozonzugabe oder durch UV-Bestrahlung.

2.4.3 Biologische Verfahren

In der biologischen Reinigungsstufe macht man sich die Aktivität einiger spezifischer Mikroorganismen zu Nutze. Dabei werden organische und anorganische Substanzen oxidiert oder mineralisiert. Es bilden sich Endprodukte wie Kohlenstoffdioxid, Wasser, Nitrat, Sulfat und Schlamm, der weiterbehandelt werden muss. Innerhalb der biologischen Stufe unterscheidet man den aeroben Abbauprozess, der unter Verbrauch von Sauerstoff abläuft vom anaeroben Abbauprozess, der nur ohne Anwesenheit von Sauerstoff möglich ist.

Für die biologische Stufe sind günstige Lebensbedingungen erforderlich wie eine angemessene Temperatur, neutraler pH-Wert, ausreichendes Sauerstoffangebot (bei aerobem Abbau) und ausreichendes Nährstoffangebot sowie Abwesenheit von Bakteriengiften und eine ausreichende Aufenthaltszeit.

Tropfkörperverfahren: Das Tropfkörperbecken enthält grobkörniges Material, das große Ansiedlungsflächen für Mikroorganismen bietet. Durch die Grobkörnigkeit wird auch die Gefahr einer Verstopfung des Tropfkörpers verhindert. Das Abwasser wird über Drehsprenger auf der Tropfkörperoberfläche verteilt und passiert den Tropfkörper von oben nach unten. Auf dieser Fläche siedeln sich nach bestimmter Zeit bei geeigneten Lebensbedingungen Bakterien und andere Kleinlebewesen an. Sie wandeln organische Stoffe zu absetzbaren Stoffen um, wobei flockige Schlamnteilchen entstehen. Sie werden ausgeschwemmt, und lassen sich leicht im Nachklärabsetzbecken sedimentieren.

Bei mehrstufigen Kläranlagen werden Tropfkörperverfahren häufig als erste Stufe verwendet, während die zweite Stufe aus Belebungsbecken besteht.

Belebungsverfahren: Die Abwasserreinigung in Belebungsbecken erfolgt in großen offenen Becken mit hohem Sauerstoffeintrag und guter Wasserturbulenz. Dadurch findet in den Belebungsbecken die natürliche Selbstreinigung sehr intensiv in kurzer Zeit statt. Luftzufuhr allein reicht aber nicht aus. Hinzukommen muss eine Temperatur im Bereich von 25 - 35 °C. Der pH-Wert kann zwischen Werten von 6,5 – 8,5 schwanken. Im Belebungsverfahren müssen diese Faktoren stets kontrolliert und überwacht werden.

Beim Belebungsverfahren wird Sauerstoff mit technischen Maßnahmen zugeführt, z.B. durch:

- Oberflächenbelüftung mit Bürstenwalzen, Kreiselbelüftern und auf die Oberfläche gerichteten Wasserstrahlen,
- Tiefenbelüftung,
- Blasenerzeugung durch Druckluft vom Beckenboden her.

Der dabei entstehende Schlamm wird anschließend in einem Nachklärabsetzbecken sedimentiert.

2.4.4 Naturnahe Verfahren

Sogenannte natürliche Verfahren orientieren sich an den Prozessen, die in Gewässern unter natürlichen Bedingungen ablaufen. Dabei kommt den pflanzenreichen Uferbereichen von Flüssen und Seen eine besondere Bedeutung zu. Sie haben in den letzten Jahren größere Aufmerksamkeit bekommen, insbesondere weil sie sich gut für dezentrale Abwasserreinigung eignen. In ländlichen Bereichen, wo das Abwasser viele Kilometer zu einer zentralen Kläranlage transportiert werden muss, fallen damit sehr hohe Kosten an, die bei dezentralen Anlagen eingespart werden können. Außerdem erweisen sich die hohen Baukosten zentraler großer Kläranlagen als ungünstig. Es hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten in Deutschland gezeigt, dass "natürliche Verfahren" vor allem für kleine Siedlungen zur Reinigung häuslichen Abwassers eine sehr gute Lösung darstellen. Dabei werden folgende Verfahren unterschieden:

Rieselfverfahren: Das Abwasser wird in eine sandige Fläche mit Gefälle geleitet, wo es versickert. Der Flächenbedarf liegt dabei zwischen 10 - 60 m² pro Einwohner bei einer durchschnittlichen hydraulischen Belastung von 5 mm/d. (*Bahlo, K. und Wach, G., 1992, S. 48*).

Mit dem Anwachsen der Städte und der damit verbundenen Zunahme der Abwassermenge entwickelte die Abwasserentsorgung andere Verfahren, die zwar mehr Energie benötigen, aber weniger Platz brauchen, wie Tropfkörper oder Belebungsanlagen

Sandfilter: Das Abwasser wird in ein sandiges Kiesbett geleitet, wo es versickert. Die Sandfilter neigen dazu, leicht zu verstopfen. Deswegen ist eine gute Vorklärung nötig, und in bestimmten zeitlichen Abständen muss eine Durchspülung des sandigen Kiesbetts vorgenommen werden.

Pflanzenkläranlagen: Ein Sandkiesfilter wird mit Sumpfpflanzen bepflanzt. Untersuchungen zeigen, dass die Anzahl der Mikroorganismen in bepflanzttem Boden viel größer ist als in wurzelfreiem Boden. Dies

liegt vor allem daran, dass die unterirdischen Pflanzenteile Durchlüftungsgewebe enthalten, die atmosphärischen Sauerstoff von den oberirdischen Pflanzenteilen in die unterirdischen Pflanzenteile diffundieren lassen. Dies ist die Voraussetzung für eine Ansiedlung aerober Mikroorganismen im unmittelbaren Umfeld der Pflanzenwurzeln und Rhizome (Bakterien, Pilze, Algen). Daneben finden aber auch anaerobe Abbauprozesse statt. Dies ist insbesondere für die Denitrifikation wichtig. Die biologische Reinigung des Abwassers geht mit einer parallelen Filtration einher.

Teichanlagen: Das Abwasser wird in Teiche eingeleitet, die sich in einem tiefen Erdbecken befinden. Nach einer längeren Aufenthaltszeit läuft das gereinigte Wasser an der anderen Seite ab. Entstehender Schlamm setzt sich ab und geht in anaerobe Zersetzung über. Man unterscheidet belüftete Teiche von unbelüfteten Teichen. In unbelüfteten Teichen gelangt der Sauerstoff durch die Oberfläche ins Wasser. Der Abbau der organischen Stoffe erfolgt je nach Sauerstoffgehalt durch aerobe und durch anaerobe bakterielle Prozesse.

2.5 Klärschlammbehandlung

In Kläranlagen setzt sich Klärschlamm aus dem Primärschlamm der mechanischen Stufe und dem Sekundärschlamm der biologischen Stufe zusammen. Der Anteil, der aus der mechanischen Stufe stammt, besteht hauptsächlich aus Sand, während der Schlamm der biologischen Stufe vorwiegend Biomasse enthält. Demnach setzt sich Klärschlamm aus mineralischen und organischen Materialien zusammen. Dabei können auch Giftstoffe wie Aromate, chlorierte Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle enthalten sein. Hinzu kommt ein hoher Anteil an freiem und gebundenem Wasser. Eine sinnvolle Behandlung des Schlammes erfordert zunächst drei Arbeitsgänge:

1. Stabilisierung
2. Entwässerung und
3. Beseitigung

2.5.1 Schlammstabilisierung

Die Schlammbehandlungsverfahren dienen besonders der weitergehenden Verringerung von organische Feststoffen und von geruchsbildenden Inhaltsstoffen, wodurch sich Klärschlamm besser entwässern lässt und Krankheitserreger vermindert werden.

Die Klärschlammstabilisierung erfolgt durch chemische, thermische, aerobe biologische oder anaerobe biologische Stabilisierung

2.5.2 Schlammentwässerung

Ausgefaulter Schlamm enthält etwa 90 - 98% Wasser. Wenn Schlamm gut verfault, lässt er sich auch gut entwässern. Hierzu verwendet man Zentrifugen oder Bandfilterpressen. Wegen der hohen Kosten der Schlammentwässerung werden auch, wenn es räumlich möglich ist, natürliche Verfahren benutzt. Dazu wird Schlamm auf große Flächen (Kiesbeete, Schlammteiche, usw.) gebracht, verteilt und getrocknet. Meist ist dabei ein Wechselbetrieb über mehrere Plätze erforderlich.

2.5.3 Schlammbeseitigung

Wenn Schlamm mit Schwermetallen belastet ist, wird er deponiert, ganz selten verbrannt. Häuslicher Schlamm, in dem alle pathogenen Organismen abgestorben sind, wird für die Landwirtschaft verwendet. Klärschlamm, der aus kommunalen Kläranlagen stammt, ist reich an organischen Stoffen. Er wird als wertvolles Bodenverbesserungsmittel eingesetzt.

3. Pflanzenkläranlagen

Früher hat es die Natur geschafft, die belastenden Stoffe des ungeklärten Abwassers abzubauen und die Verschmutzung des Oberflächen- und Grundwassers unter der *Deadline* zu halten. Mit dem steigenden Wasserverbrauch und der damit verbundenen Zunahme der Abwassermenge reichte jedoch die Selbstreinigungskraft der Gewässer nicht mehr aus, es mussten technische Lösungen gesucht werden.

Die Schwemmkanalisationen, durch die Abwasser in die Flüsse geleitet wurde, bezeichneten den ersten Typ der Abwasserentsorgung in vielen europäischen Städten. Mit Zunahme des Wasserverbrauchs und damit der Abwassermenge wurde in einem Gutachten für die Stadt London empfohlen, die Schwemmkanalisationen zu behalten, aber nicht in die Themse zu leiten sondern auf Äcker und Wiesen. Diese Vorschläge führten zur Methode der Abwasserentsorgung auf Rieselfeldern in großen Städten wie Danzig, Münster und Berlin (*Wissing, W., 1995, S. 16*).

Die Entwicklung der Industrie, sowie die weitere Steigerung des Wasserverbrauchs und die damit verbundene Zunahme des Flächenbedarfs für Naturreinigungssysteme führten zu neuen Methoden der Abwasserreinigung, indem man konventionelle Kläranlagen baute, die heute einen hohen technischen Stand erreicht haben.

Mit der Steigerung des Umweltbewusstseins wendet man sich heute den Pflanzenkläranlagen zu, um die Selbstreinigungskraft der Natur bei geringem Energieeinsatz und minimalen Baukosten zu nutzen. Aber warum kehrt man nicht einfach zur Nutzung von Rieselfeldern zurück? Den Grund dafür zeigt eine Untersuchung über die gefundenen Gruppen von Mikroorganismen in einem mit Weizen bepflanzen Boden im Vergleich zu einem Boden ohne Wurzeln. Man erkennt, dass in einem durchwurzelt Boden stets wesentlich mehr Mikroorganismen zu finden sind als in einem wurzelfreien Boden.

Tabelle 2: Zahl der Mikroorganismen in einem bepflanzten und einem wurzelfreien Boden

Mikroorganismen	Durchwurzelter Boden Anzahl pro g Trocken- masse	Wurzelfreier Boden Anzahl pro g Trocken- masse
Bakterien	$1200 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^6$
Actinomyceten	$46 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$
Pilze	$12 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
Protozoen	$24 \cdot 10^2$	$10 \cdot 10^2$
Algen	$5 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$

(Bahlo, K. und Wach, G., 1992, S. 51)

Die Zahl der Mikroorganismen zeigt deutlich, dass Pflanzenwurzeln die Lebensbedingungen für Mikroorganismen verbessern können. Aber die Aufgabe der Wurzeln besteht nicht nur darin, sondern auch in der Öffnung bzw. im Offenhalten des Bodenkörpers. Ohne die Wurzeln würde der Boden nach einer bestimmten Zeit verdichten und verstopfen.

3.1 Aufbau von Pflanzenkläranlagen

Pflanzenkläranlagen sind überwiegend biologisch-natürliche Systeme, in denen Bodenfilter, Sumpfpflanzen und Mikroorganismen harmonisch zusammenarbeiten, um das Abwasser zu reinigen und parallel zu filtrieren. Ihr Hauptbestandteil sind die sogenannten Pflanzbeete, die mit Sumpfpflanzen besetzt werden, die auf einem Filterkörper wachsen.

In der Regel wird dem Pflanzbeet eine Vorklärungsstufe vorgeschaltet, um den Beetfilter vor Verstopfung zu schützen. Zum Schutz des Grundwassers unterlegt man das Becken entweder mit einer Dichtungsfolie, betoniert es oder dichtet es mit Lehm ab. Das Abwasser verteilt man mit Hilfe einer Verteilungsdränage. Nach dem Durchsickern des Filterbodens verlässt das gereinigte Wasser die Beete über am Boden verlegte Drainagerohre.

Die Reinigungswirkung des Bodens in einer Pflanzenkläranlage ist durch den Wechsel relativ kurzer *Einstauphasen* und längerer *Trockenperioden* geprägt. Mit den Trockenperioden wird Sauerstoff zur Verfügung gestellt, so dass Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen oxidiert werden können.

Bei der Passage des Abwassers durch ein Pflanzbeet finden an den Beetpartikeln Abbauprozesse statt, durch welche die organischen Stoffe abgebaut und als Humus im Boden angereichert werden. Außerdem wird das Abwasser von Grob- und Schwimmstoffen befreit. Dabei sind die Pflanzen nicht selbst der Träger des Reinigungsprozesses, doch sie schaffen ein geeignetes Milieu für die Mikroorganismen, welche den Stoffabbau ermöglichen.

3.2 Typen von Pflanzenkläranlagen

Pflanzenkläranlagen können in unterschiedliche Typen eingeteilt werden:

Nach dem Aufbau des Beetes:

1. Das Pflanzbeet mit *nicht-bindigem* Filtermaterial auf der Basis von sandig-kiesigem Boden gebaut und mit verschiedenen Sumpfpflanzen bepflanzt.
2. Das Pflanzbeet mit *bindigem* Filtermaterial gebaut und mit Schilf bepflanzt. Zu ihnen wird auch die Wurzelraumsorgung gezählt.

(Wissing, F., 1995, S. 75-77)

Nach der Methode des Durchströmens

1. Horizontales Durchströmen: Das Abwasser strömt von einer Seite des Beets zur anderen. Man spricht von Horizontalpflanzenkläranlagen.

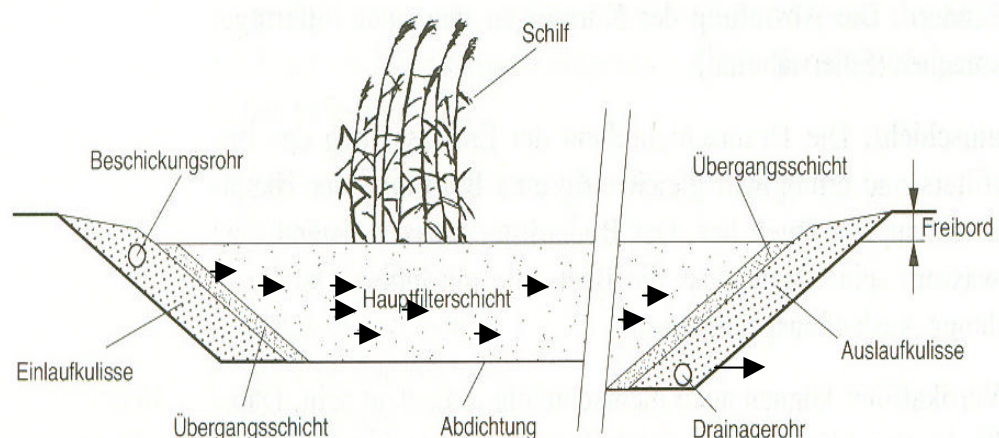


Abb. 2: Schematischer Standardaufbau eines Horizontalfilters und Strömungsrichtung (verändert nach Geller, G. und Höner, G., 2003, S. 66)

2. Vertikales Durchströmen: Das Abwasser strömt von oben nach unten durch das Beet. Man spricht von Vertikalpflanzenkläranlagen.

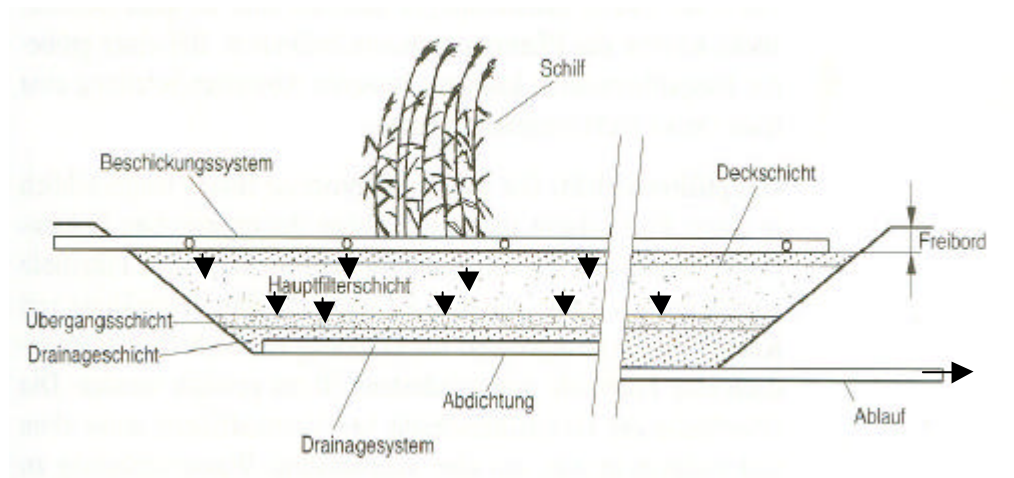


Abb. 3: Schematischer Standardaufbau eines Vertikalfilters und Strömungsrichtung (verändert nach Geller, G. und Höner, G., 2003, S. 63)

Bei mehreren Untersuchungen wurde in Deutschland festgestellt:

- Vertikalpflanzenkläranlagen sind gut zu Nitrifikationsleistungen befähigt.
- Vertikalpflanzenkläranlagen benötigen weniger Beetfläche als Horizontalpflanzenkläranlagen.
- Bei Vertikalpflanzenkläranlagen wird das Abwasser gleichmäßig über die ganze Fläche des Beets verteilt.
- Bei Horizontalpflanzenkläranlagen bleibt eine Seite des Beets immer trocken.
- Horizontalpflanzenkläranlagen erreichen generell eine bessere Denitrifikationsleistung als Vertikalpflanzenkläranlagen.
- Die Reinigungsleistung von Vertikalpflanzenkläranlagen ist in den meisten Fällen höher als die von Horizontalpflanzenkläranlagen.
- Pflanzenkläranlagen gehören zu den Klärverfahren mit sehr geringem Energiebedarf, Pflege- und Wartungsaufwand, weil der technische Anteil sehr gering ist.

(Geller, G. und Höner, G., 2003, Wissing, F., 1995, Bahlo, K. und Wach, G., 1992 und ATV-DVWA- Infopaket 3, 2002).

3.3 Geeignete Pflanzen

Zur Bepflanzung einer Pflanzenkläranlage eignen sich Sumpfpflanzen, die häufig aus periodisch überschwemmten Gebieten stammen. Sie wachsen unter Wasser zwar kaum, halten aber das Untergetauchtsein einige Zeit aus. Unter geeigneten Lebensbedingungen wachsen Sumpfpflanzen problemlos.

Sauerstoff spielt bei der Abwasserreinigung eine große Rolle, denn ohne seine Mitwirkung können aerobe Bakterien den Stoffwechsel nicht durchführen. Auch die Pflanzen benötigen für ihr Wurzelwachstum Sauerstoff, der in gut durchlüfteten Böden aus der Luft über die Bodenporen zu den Wurzeln gelangt. Sumpfpflanzen allerdings wachsen in einem wassergesättigten Boden, in dem meist kein Sauerstoff nachzuweisen ist.

Blätter, Sprossachsen und Wurzeln einer Sumpfpflanze sind jedoch durch Luftkanalsysteme miteinander verbunden. So gelangt Sauerstoff aus der Luft über die Blätter und Sprossachsen in die Wurzeln. Beim Schilf funktioniert dies sogar im Winter durch die abgestorbenen Sprossachsen.

Ein Teil des Sauerstoffs wird durch die Rhizome, der Großteil aber durch die feinen Wurzeln an die Umgebung abgegeben. Damit bildet sich in den Pflanzbeeten ein Mosaik aerober und anaerober Zonen aus, weshalb Nitrifikation und Denitrifikation gleichzeitig erfolgen können.

Zur Reinigung des Abwassers tragen die Pflanzen nur indirekt bei. Ihre Funktion besteht vor allem in der Schaffung eines günstigen Milieus für den aeroben Schmutzstoffabbau und für die Nitrifikation sowie in der Aufrechterhaltung der hydraulischen Leistungsfähigkeit des Bodens, da sie durch ihr Wurzelwachstum für die Auflockerung und Durchlüftung des Filterbodens sorgen. Außerdem nehmen sie einen Teil der Nährsalze für ihr Wachstum auf.

Die folgende Abbildung zeigt, dass der Eintrag von Sauerstoffs bei einem Schilfbeet etwa 5 g pro 1 m² und Tag beträgt. Diese Menge reicht aus, um bessere Lebensbedingungen für Organismen zu schaffen.

g O₂ / m².d

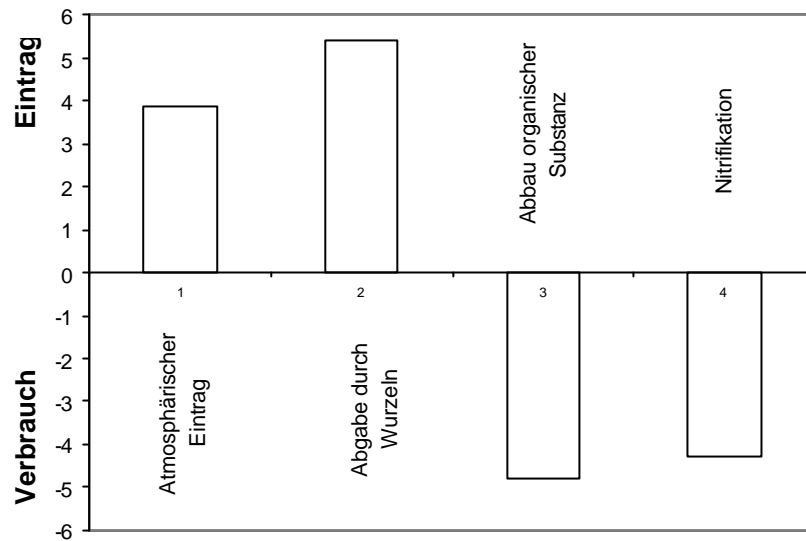


Abb. 4: Sauerstoffbilanz für ein mit Schilf bepflanztes Klärschlamm-trockenbeet (Wissing, F., 1995, S. 40).

Es gibt viele Sumpfpflanzen, die in Pflanzenkläranlagen verwendet werden können, doch nur über relativ wenige Arten liegen umfangreichere Erfahrungen vor. Einige Beispiele:

Schilf (*Phragmites australis*): Schilf ist eine Grasart. Es handelt sich um eine sonnenliebende Pflanze. Die Rhizome breiten sich im Boden vertikal und horizontal aus und können 1,5 - 2 Meter tief durchwurzeln. Die Schilfpflanze kann hohe organische Belastung ertragen und „frisst“ Nährstoffe, insbesondere Stickstoff. Durch seine besonderen Eigenschaften ist Schilf fast weltweit verbreitet. Schilf ist die in Pflanzenkläranlagen am häufigsten eingesetzte Pflanzensart.

Spanisches Rohr (*Arundo donax*): Diese Pflanzenart besitzt sehr dicke Rhizome und wächst bis zu sechs Meter hoch und mehr als 2 Meter tief.

Blaugrüne Binse (*Juncus inflexus*): bildet 40 - 60 cm hohe Pflanzen. Die Wurzeln reichen etwa 30 - 50 cm tief.

Rohrkolben (*Typha angustifolia*, *T. lalifolia* u.a. Arten): Die Wurzeln dieser Pflanzen reichen etwa 50 cm tief, die Pflanze selbst wird bis zu zwei Meter hoch.

Sumpf-Schwertlilie (*Iris pseudacorus*): Wurzelt bis zu einer Tiefe von 40 cm, Halmhöhe bis 100 cm, Blüte gelb.

Für den Bau der Anlage entschieden wir uns für Sumpfpflanzen, die am Ort wachsen wie Schilf und Spanisches Rohr.

Die Frage, welche weiteren Sumpfpflanzen sich für Pflanzenkläranlagen in Syrien besonders eignen, könnte ein weiteres interessantes Forschungsvorhaben darstellen. Dabei wäre es insbesondere interessant, Pflanzen für spezielle Aufgaben herauszufinden, z.B. für die Bepflanzung von Nachklärbecken oder für leicht salzhaltige Böden. Auch die von Seidel³ begonnenen Untersuchungen über die Fähigkeiten bestimmter Sumpfpflanzen aromatische Verbindungen abzubauen, könnten wieder aufgenommen werden.

3.4 Biochemische Vorgänge im Pflanzenbeet⁴

Im Abwasser befinden sich in erster Linie feste und gelöste organische und anorganische Schmutzstoffe, die durch den Reinigungsprozess entfernt werden müssen.

In der vorgeschalteten Vorreinigungsstufe wird das Abwasser von Feststoffen befreit und damit die organische Belastung um etwa ein Drittel reduziert.

Im Pflanzenbeet kommt es dann zur Reinigung des Abwassers durch das Zusammenwirken biologischer, physikalischer und chemischer Prozesse. Die Mikroorganismen im Beet nehmen aus dem Abwasser Nährstoffe auf, wachsen und vermehren sich, werden im Beet zurückgehalten und sterben ab.

³ Käthe Seidel (†1991) hat als erste die Bedeutung und das Potential der höheren aquatischen Vegetation für Wasserreinigungszwecke erkannt und sich energisch für ihre wissenschaftliche und zugleich praxisrelevante Erforschung eingesetzt. (Wissing, F., 1995, S.75)

⁴ 3.4 stützt sich auf die Standardliteratur, insbesondere: Geller, G. und Höner, G., 2003, Wissing, F., 1995, Lorenz, S., 2002 und ATV-DVWA- Infopaket 3, 2002.

Für die meisten Abbau-, Umwandlungs- und Festlegungsmechanismen ist eine ausreichende Sauerstoffversorgung notwendig. So hängt der aerobe Abbau organischer Stoffe wie Kohlenstoffverbindungen, die Nitrifikation und die Fixierung von Phosphor stark vom Sauerstoffgehalt ab. Die Belastung des Abwassers mit organischen Kohlenstoffverbindungen wird als chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) oder als biologischer Sauerstoffbedarf (BSB₅) gemessen.

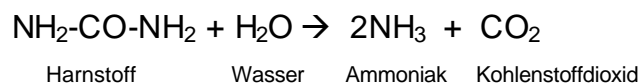
Beim aeroben Abbau werden die organischen Kohlenstoffverbindungen durch mehrere Schritte zu Endprodukten wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) oxidiert. Der anaerobe Abbau vergärt die organischen Kohlenstoffverbindungen zu Biogas CH₄ und Kohlenstoffdioxid CO₂. Allgemein lässt sich die Oxidation der organischen Substanzen folgendermaßen darstellen:

Organische Substanz + Sauerstoff → Kohlenstoffdioxid + Wasser + (Nährsalze)

Neben den Organismen, die für den Abbau organischer Substanz zuständig sind, gibt es andere Mikroorganismen, die von anderen (mineralischen) Oxidationsprozessen leben.

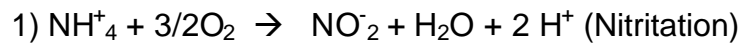
Im biologischen Reinigungsprozess müssen die enthaltenen Stickstoffverbindungen wie Harnstoff und Eiweiße in eine für Nitrifizierer verwertbare Form abgebaut werden.

Harnstoff wird durch Enzymaktivität in Ammoniak und Kohlenstoffdioxid gespalten, ein Prozess, der als Ammonifikation bezeichnet wird:

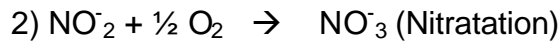


Eiweiße bestehen aus Aminosäuren, in denen Stickstoff ein wichtiger Bestandteil ist. Sie werden zu Ammonium-Verbindungen abgebaut. Ein überwiegender Teil dieser Ammonifikation findet bereits in der Kanalisation statt, wobei Ammoniak weiter zu Ammonium umgesetzt wird.

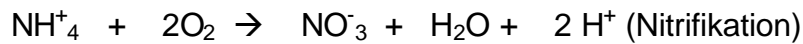
Ammonium wird entweder von Wasserpflanzen und Algen direkt aufgenommen oder bei ausreichendem Sauerstoffangebot durch sogenannte Nitrifikanten umgesetzt, die Ammonium über Nitrit zu Nitrat oxidieren. Der Prozess läuft in zwei Schritten ab:



Ammonium Sauerstoff Nitrit Wasser Säure



Nitrit Sauerstoff Nitrat



Ammonium Sauerstoff Nitrat Wasser Säure

Die Umwandlung zu Ammoniak erfolgt, wenn der pH-Wert über 7 steigt (alkalischen Milieu):



Ammonium Lauge Ammoniak Wasser

Da Ammoniak für Lebewesen eine giftige Substanz ist, sollte der pH-Wert des Abwassers 7 nicht überschreiten.

Wo wenig Sauerstoff vorhanden ist, schließt sich die Denitrifikation an. Dadurch wird das entstandene Nitrat zu molekularem Stickstoff N_2 reduziert. Aus diesem Grund müssen technische Kläranlagen auch anaerobe Klärbecken enthalten. Im Gegensatz dazu findet in Pflanzbeeten, in denen es stets ein Mosaik aus sauerstoffreichen und sauerstoffarmen Zonen gibt, Nitrifikation und Denitrifikation gleichzeitig statt. Für die Reduzierung des Nitrats ist die Anwesenheit einer Kohlenstoffquelle (Glucose) entscheidend. Der Denitrifikationsprozess wird wie folgt dargestellt:



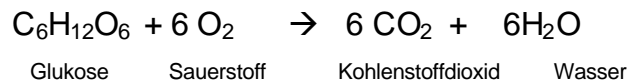
Glucose Nitrat Säure Kohlenstoffdioxid Wasser Stickstoff

Auch Ammonium kann durch bestimmte Mikroorganismen unter der Anwesenheit von Nitrat anaerob oxidiert werden:

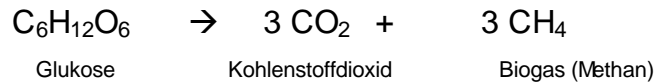


Ammonium Nitrat Stickstoff Wasser Säure

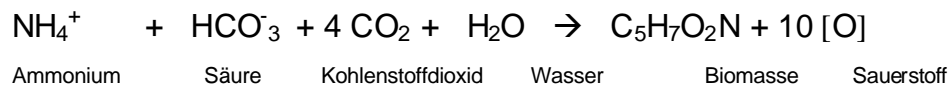
Aerober Abbau der Glucose:



Anaerober Abbau der Glucose:



Die Energie, die bei der Oxidation von Ammonium, Nitrit und Glucose freigesetzt wird, verwenden Nitrifikanten vor allem zum Aufbau neuer Biomasse:



3.5 Vor -und Nachteile von Pflanzenkläranlagen

Seit Anfang der achtziger Jahre des vorigen Jahrhunderts werden in Deutschland dezentrale Pflanzenkläranlagen zur Reinigung von häuslichen Abwässern gebaut. Mittlerweile sind in Deutschland viele Pflanzenkläranlagen in Betrieb, an denen Langzeiterfahrungen gesammelt werden konnten. Auf dieser Grundlage stellen deutsche Experten Pflanzenkläranlagen als geeignete Methode der Abwasserreinigung dar.

Pflanzenkläranlagen haben viele Vorteile:

- Preisgünstigkeit bei hoher Effektivität,
- Nutzung der biologischen Selbstreinigungskräfte der Natur,
- Schaffung naturnaher Biotope bei guter Einpassung in die Landschaft,
- geringer oder gar kein Energiebedarf,
- lange Kanalnetze sind überflüssig, die Klärung erfolgt direkt am Ort des Abwasseranfalls,
- geringer technischer Aufwand,
- langfristige Stabilität und geringere Betriebskosten,

- keine Geruchsbelästigung,
- wirkungsvolle Elimination vieler Erreger von Infektionskrankheiten, wie Bakterien und Wurmeier,
- sehr geringer Pflege- und Wartungsaufwand,
- keine Schwierigkeiten bei der Abtrennung der Belebtschlammflocken,
- das zurückgehaltene Phosphat wird im Bodenmaterial angelagert,
- hohe Akzeptanz bei den Anwohnern.

Nachteile von Pflanzenkläranlagen:

- großer Flächenbedarf,
- geringe Leistung in kalten Jahreszeiten,
- Betriebsführung ist nicht vollständig manipulierbar,
- Versalzungsgefahr des Bodens in Trockenperioden,
- Reduzierung der Abflussleistung durch Verstopfung (Wurzelwachstum oder Verschlämmung) der Poren im Boden,
- ungesteuertes System, das auf extreme Schwankungen der Abwassermenge nicht einstellbar ist.

(Geller, G. und Höner, G., 2003, Wissing, F., 1995 und ATV-DVWA-Infopaket 3, 2002).

4. Zur Situation der Abwasserreinigung in Syrien

Syrien liegt im Nahen Osten, der mit überwiegend ariden bzw. semi-ariden Klima, geringen Niederschlägen und sinkendem Grundwasserspiegel eine Zone der Wasserknappheit darstellt (s. Tabelle 3 und Abb.10). Das enorme Bevölkerungswachstum von etwa 3,4% (Volkscählungsbüro, 2000) verursacht bei schwindendem Wasserangebot einen zunehmenden Wasserbedarf. Gleichzeitig erhöht das Bevölkerungswachstum den Bedarf an Nahrungsmitteln. Dies wiederum erfordert eine Intensivierung der Landwirtschaft mit zunehmendem Bedarf an Wasser für die Bewässerung der Felder und einem erhöhten Bedarf an Kunstdünger. Die dafür erforderliche Industrie vermehrt ebenfalls den Verbrauch an Süßwasser und trägt zur Wasserverschmutzung bei.



Abb. 5: Übersichtskarte des Nahen Ostens
(http://www.lib.utexas.edu/maps/middle_east_and_asia/middleeast_ref01.jpg) (Stand 19. August 2004)

Syrien leidet wie andere mediterrane Länder nicht nur unter Wasserknappheit, sondern teilweise auch unter verschmutztem Wasser, das

durch ungeklärte Abwässer erzeugt wird. Das Land besitzt erneuerbare Wasserressourcen von etwa 10,5 Millionen m³/Jahr.

Mit der hohen Rate des Bevölkerungswachstums findet eine zunehmende Wassernutzung statt. So wurde errechnet, dass Syrien im Jahr 2015 rund 24,2 Milliarden m³ Wasser pro Jahr benötigt, davon etwa 87% für die Landwirtschaft (*Bewässerungsministerium, 2001*). Eine rasche Lösung dieses Problems ist nötig, bevor die Wasserknappheit ein Heer von „Wasserflüchtlingen“ auf die Beine bringt, die ihr Land wegen Wasser- und Nahrungsmangel in Richtung von Zuwanderungsgebieten verlassen.

Syrien ist 180.000 km² groß und in 7 Bassins (Landschaftsräume) und 14 Provinzen (*s. Anhang 9.6*) unterteilt. Syrien hat 17,5 Millionen Einwohner (*Volkszählungsbüro, 2000*). Die Bevölkerungsdichte ist in den unterschiedlichen Landesteilen sehr verschieden.

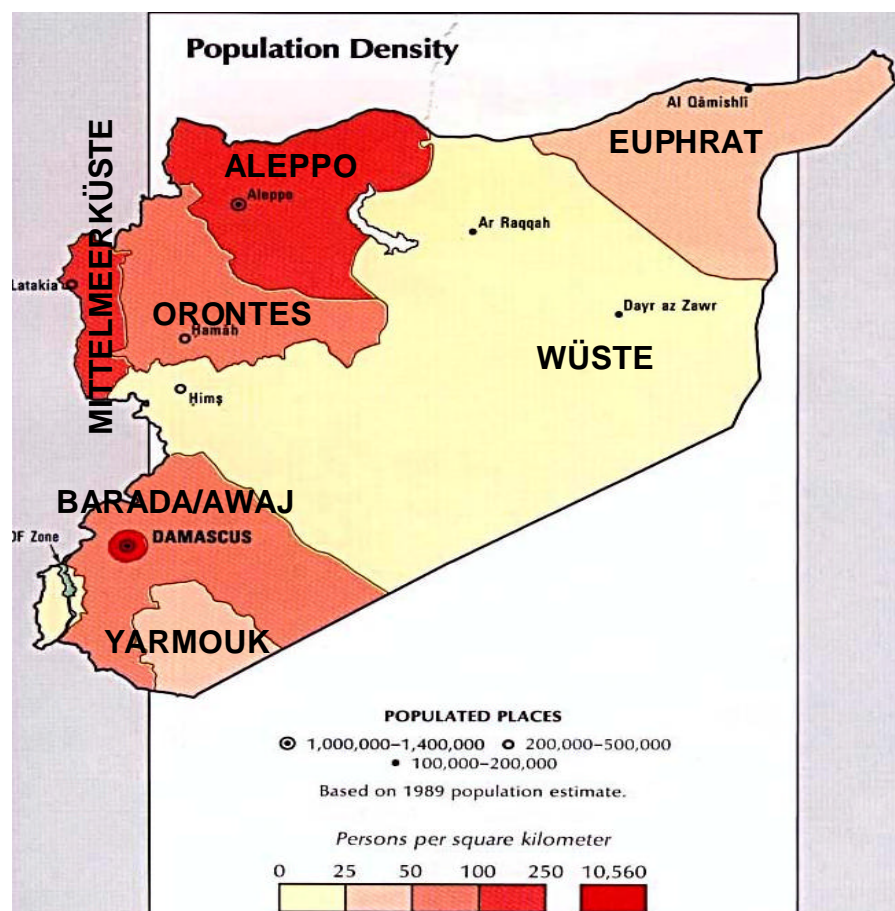


Abb. 6: Bevölkerungsdichte in Syrien und verteilte Bassins (*verändert nach http://www.lib.utexas.edu/maps/atlas_middle_east/syria_pop.jpg*)

4.1 Nutzung und Verfügbarkeit von Wasser in Syrien

Der gesamte Wasserverbrauch in Syrien wird nach dem *Irrigation Report* der Weltbank vom April 2001 auf rund 15 Milliarden m³/a geschätzt. Der Report legt dar, dass bis zum Jahr 1997 noch ein Plus von rund 1.620 Millionen m³ erneuerbare Wasserressourcen gegenüber dem Verbrauch gegeben war. Die landesweite Wassernutzung und Wasser-
verfügbarkeit im Verhältnis zum Wasserverbrauch sind in der folgenden Grafik und in der Tabelle 3 dargestellt:

Anteile der Wassernutzung in Syrien

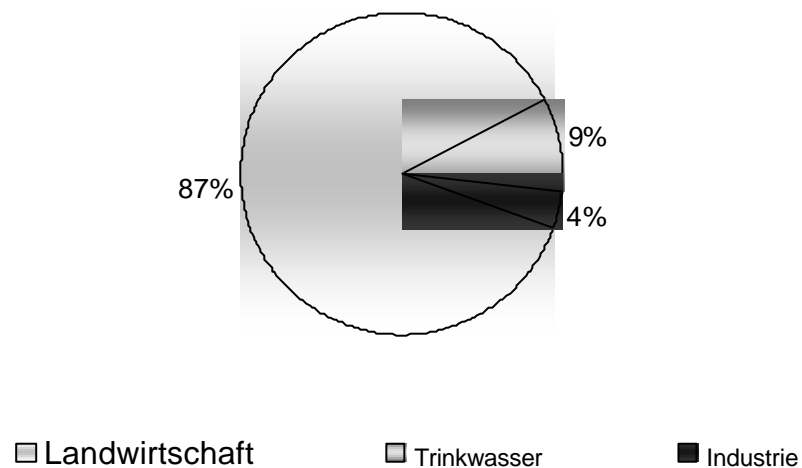


Abb. 7: Anteile der Wassernutzung in Syrien (*Bewässerungsministerium 2001*)

Tabelle 3: Wasserverfügbarkeit und Wasserverbrauch in den sieben Bassins Syriens, Werte in Millionen m³/a

Bassin	Bewässerung	Öffentliche Wasserversorgung	Industrieller Wasserbedarf	Gesamtverbrauch	Erneuerbare Wasserressourcen	Defizit
YARMOUK	360	70	10	440	500	60
ALEPPO	780	280	90	1.150	500	-650
ORONTES	2.230	230	270	2.730	3.900	1.170
BARA-DA/AWAJ	920	390	40	1.350	900	-450
MITTEL-MEERKÜSTE	960	120	40	1.120	3.000	1.180
WÜSTE	340	40	10	390	700	310
EUPHRAT	7.160	250	110	7.520	n. a.	n. a.
Total	12.750	1.390	570	14.700		
% Anteil	87 %	9%	4%	100%		

(Bewässerungsministerium: Irrigation Sector, Report April 2001)

4.2 Probleme

Syrien gehört wie die meisten Länder des Nahen Osten zu den wasserarmen Ländern der Erde, die überwiegend wüstenartiges Land haben. Mehr als 87% Prozent des verfügbaren Süßwassers fließen in die Landwirtschaft. Nur 9% dienen der Trinkwasserversorgung und 4% industriellen Zwecken (Bewässerungsministerium, 2001).

Wasser wird in Syrien als quasi-öffentliches Gut angesehen und fast kostenlos an den Nutzer abgegeben⁵. Der durchschnittliche Wasserverbrauch beträgt 150 - 200 Liter pro Person und Tag auf dem Land viel weniger, etwa 40 - 60 Liter pro Person und Tag, (Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen Syrien, 2003). Bei diesen Be-

⁵ Die ersten 20 m³ Wasser kosten 3 SP/m³, für das Abwasser werden 5 % von den Wasserkosten genommen.

Von 20 - 30 m³ kostet 1m³ Wasser 4,5 SP, für das Abwasser werden 10 % von den Wasserkosten genommen

Von 30-60 m³ kostet 1m³ Wasser 13,5 SP, für das Abwasser werden 15 % von den Wasserkosten genommen

Ab 60 m³ Wasser kostet 19 SP/m³, für das Abwasser werden 20% von den Wasserkosten genommen.

Die Abwasserkosten werden nur erhoben, wo Abwasserreinigungsanlagen vorhanden sind.

dingungen fällt der Grundwasserspiegel in der Region etwa 1 - 2 Meter jährlich (*Bewässerungsministerium, 2001*).

Die folgende Liste verdeutlicht die Situation der Abwasserbewirtschaftung in Syrien:

- Die Abwassermenge (Haushaltabwasser und Industrieabwasser) in Syrien liegt zwischen 1,2 - 1,3 Milliarden m³/a.
- Davon werden etwa 416 Millionen m³ /a ohne Reinigung für etwa 2,5% der bewässerten Fläche genutzt.
- 473 Millionen m³/a Abwasser werden gereinigt und bewässern etwa 2,9% der bewässerten landwirtschaftlichen Fläche.
- Etwa 311 Millionen m³/a Abwasser gelangen ungereinigt ins Meer und in die Bäche.
- In zehn großen Städten sind keine Kläranlagen vorhanden.
- Alle mittleren und kleinen Städte außer SALAMIEH haben keine Kläranlagen.
- Alle Dörfer und kleinen Gemeinden außer *HARAN AL-AWAMIED* besitzen keine Kläranlagen.
- Die Industrieabwässer der Gerbereien, Schlachthöfe, Lebensmittelindustrien und aller Erdölindustrien werden zurzeit noch ohne Vorklärung direkt in die öffentliche Kanalisation eingeleitet. Dadurch leidet der biologische Abbauprozess in allen vorhandenen Kläranlagen.
- In vielen Dörfern und kleinen Gemeinden fehlen nicht nur Kläranlagen, sondern oft auch die Entsorgungskanäle für das Abwasser.

(Informationen des Bewässerungsministeriums, 2001 und Ministeriums für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen, 2003)

Die folgende Tabelle zeigt die Abwassersituation in Syrien.

Tabelle 4: Abwassersituation in Syrien

Stadt	Bevölkerungszahl	Abwassermenge m ³ /Tag	BSB Zulauf mg/l	BSB Ablauf (geplant) mg/l	Reinigungsmethoden	Zustand
DAMASKUS	2,2 Mio.	485.000	460	20	Belebungs-schlamm	In Betrieb seit 1981
ALEPPO	2 Mio.	255.000	400	20	Oxidation Gräben	In Betrieb seit 1985
HAMAH	500.000	70.000	300	30	Oxidation Gräben	In Betrieb seit 1981
HIMES	655.000	135.990	507	30	Belebungs-schlamm	In Betrieb seit 1981
DAR'A	124.000	21.800	232	(25)	Belebungs-schlamm	Finanzierungssuche seit 1994
AS SUWEYDA	138.200	18.750	290	(25)	Belebungs-schlamm	Finanzierungssuche seit 1995
IDLEB	182.500	30.000	395	(40)	Oxidation Gräben	Finanzierungssuche seit 1989
LATAKIA	506.500	100.830	327	(30)	Oxidation Gräben	Finanzierungssuche seit 1985
TARTUS	145.400	33.437	344	-	-	-
SALAMIEH	45.000	5.850	532	40	Unbelüftete Gräben	In Betrieb seit 1990
HARAN AL – AWA-MIED	7000	250	320	30	Pflanzenklär-anlage	In Betrieb seit 2000

(Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen, 2001)

Hygienemaßnahmen

Vom Gesundheitsministerium wurde im Jahr 1997 berichtet, dass mehr als 75% der Bevölkerung in der Umgebung der Hauptstadt DAMAS-

KUS (RIF DIMASHQ – Provinz) zur Zeit an *Dysenterie* leiden, die über im Wasser oder in der Nahrung vorhandene Erreger übertragen wurde. In „*Die Auswirkung der Abwassernutzung in der arabischen Landwirtschaft*“, einer Studie der *Arab Organization for Agricultural Development* von September 2001, steht, dass in Syrien zwischen 1991 und 1995 die Erkrankungen an *Typhus* und *Infektiöser Hepatitis* auf den zehnfachen Wert gestiegen sind und die Zahl der Darmerkrankungen sich verdoppelte.

Dies ist nicht nur ein humanitäres Problem. Es ist auch mit hohen Kosten verbunden. Einmal entstehen sie durch die direkte Behandlung der Kranken, zum anderen auch durch Arbeitsausfall. Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsprojekte haben deshalb in Syrien einen hohen Stellenwert. Entsprechende Projekte in ländlichen Gebieten erhalten staatliche Fördergelder.

Abwasser enthält eine Vielzahl von pathogenen Keimen, die - insbesondere durch die Nutzung von ungeklärtem Abwasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft - viele Krankheiten verursachen können. Auch in *HARAN AL-AWAMIED* soll das gereinigte Abwasser in der Landwirtschaft verwendet werden. Deswegen müssen nicht nur organische und anorganische Substanzen entfernt, sondern auch Krankheitserreger reduziert werden.

4.3 Politische Konsequenzen

Für die Wasser- und Abwasserwirtschaft sind in Syrien eine Vielzahl von Ministerien zuständig, denen die Kontrolle über die Planung der Abwasseranlagen und die Nutzung der Wasserressourcen und des geklärten Abwassers obliegt. Leider kommunizieren die Ministerien kaum miteinander, was zu Schwierigkeiten bei der Planung und bei der Umsetzung der Pläne führt.

Syrien muss als nationales Ziel ansehen, Politikern und der Bevölkerung zu verdeutlichen, dass die Abwasserreinigung nicht nur für den Umweltschutz, sondern auch für die Nutzung in der Landwirtschaft eine Rolle spielt. Wasser- und Abwasserprobleme müssen auf die politische

Tagesordnung gesetzt werden, um geeignete Lösungen zu finden und durchzusetzen.

Es hat bereits ein Umdenkprozess begonnen, der zu einem effizienteren und sparsameren Umgang mit Wasser führen wird, wobei neue Bewässerungssysteme genutzt werden sollen und andere Quellen für Bewässerung geschaffen werden:

Die älteste Methode der „Wasservermehrung“ ist auch in Syrien der Bau von Staudämmen. Daneben versucht man die Süßwassermenge zu reduzieren, die für Bewässerungen genutzt wird. Die Nutzung der neuen Bewässerungsmethoden wie Tropf-, Nacht- und Sprühregenbewässerung in der Landwirtschaft hilft bei der Bekämpfung der Wasserknappheit, da dabei Süßwasser gespart wird.

In Syrien werden zurzeit jedoch nach Auskunft des Bewässerungsministeriums immer noch etwa 1,35 Mio. Hektar nach der alten Methode bewässert (Überflutung der Gräben durch lange und offene Kanäle).

Wasser sparen gilt in vielen Ländern mit Wasserknappheit heute noch als unattraktive Lösung, obwohl dies meistens wesentlich kostengünstiger ist als z.B. neue Tiefbrunnen zu bohren oder Wasser aufzubereiten. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Wasserbilanz besteht darin, Wasser mehrmals zu nutzen (*Recycling*). So könnte der größte Teil des Industriebrauchwassers mehrfach „recycelt“ werden, indem man es in geschlossene Kreisläufe führt.

Außerdem gibt es die Möglichkeit, der Landwirtschaft gereinigtes Abwasser für Bewässerungszwecke zur Verfügung zu stellen. Damit können auch die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe von Neuem genutzt werden. Das würde einen Gewinn für wasserarme Länder wie Syrien bedeuten. Aber die Nutzung gereinigter Abwässer in der Landwirtschaft erfordert auch ein besonderes Management, das sich an den chemischen, physikalischen und hygienischen Eigenschaften des gereinigten Abwassers orientiert.

Halten wir fest:

Die zur Verfügung stehenden Wasserreservoirs werden in Syrien zurzeit unkontrolliert genutzt. Es wird mehr Wasser entnommen als durch Niederschläge hinzukommt. Die Umweltverschmutzung durch Nutzung ungeklärten Abwassers für die Bewässerung hat die Situation verschärft. Für eine wesentliche Verbesserung der Situation fehlt jedoch das Geld. Die sehr kostengünstige Einrichtung von effektiven Pflanzenkläranlagen könnte in dieser Situation helfen. In Deutschland stellen Pflanzenkläranlagen für Abwasserreinigung bekannte und anerkannte Verfahren dar. In Syrien konnte man sich bislang unter einer „Pflanzenkläranlage“ nichts vorstellen. Wie sollte man Abwasser mit der Hilfe von Pflanzen reinigen können? Also musste an einem Beispiel demonstriert werden, dass diese Methode tatsächlich funktioniert. Man musste zeigen, dass sich naturnahe Abwasserreinigungssysteme gut in das Landschaftsbild einpassen, dass sie sich kostengünstig errichten und energiesparend betreiben lassen. Die Technologie der Pflanzenkläranlage sowie ihre möglichen Reinigungseffekte, einschließlich der Grenzen ihrer Anwendung hinsichtlich der Flächennutzung, der Geruchsfreiheit und ihrer Einpassung in das Landschaftsbild, mussten erprobt werden, um eine Einschätzung für die mögliche Breitenanwendung dieser Technologie in semiariden Gebieten wie Syrien zu zeigen.

Um hierfür Erfahrungen zu sammeln, wurde eine Pflanzenkläranlage als Pilotanlage vor Ort gebaut und untersucht. Für die Entwicklung eines passenden Konzepts war die Kooperation zwischen Regierung und Gesellschaft auf allen Ebenen erforderlich.

4.4 Zentrale oder dezentrale Kläranlagen?

In Syrien wurden bis jetzt nur zentrale Systeme geplant und eingerichtet. Dagegen sprechen aber mehrere Argumente:

- Alle Angeschlossenen sind betroffen, wenn ein zentrales System versagt.
- Die Kosten für den Bau der Anlage, und um die Kanäle in Betrieb zu halten, sind enorm. Sie machen mehr als 70% der gesamten Ab-

wasserbehandlungsmaßnahme aus. (*Informationen des Wohnungs-
bau- und Versorgungsministeriums, 2001*).

- Durch die Vermischung aller Abwasserarten (Industrieabwasser, Regenwasser und Haushaltsabwasser) haben die Kläranlagen in *DAMASKUS* und Aleppo und an anderen Orten große Probleme, die sich aus der Abwassermenge und dem Verschmutzungsgrad des Abwassers ergeben.
- Zentrale Kläranlagen stehen für eine Nutzung geklärter Abwässer am Entstehungsort nicht zur Verfügung.
- Durch die Vermischung aller Abwasserarten besteht keine Möglichkeit den Schlamm als Dünger in der Landwirtschaft zu verwenden, weil er mit Schwermetallen belastet ist. (Die Verwaltung der *DAMASKUS*-Anlage hat deswegen noch keine Genehmigung vom Landwirtschaftsministerium für die Nutzung des Schlammes in der Landwirtschaft).
- Neue Siedlungen oder Stadtteile werden einfach an die bestehende zentrale Kläranlage angeschlossen. Das führt bald zur Überforderung der Anlage, außerdem lässt die Reinigungsleistung nach.
- Bei langen Kanalisationswegen steigen die Baukosten und die Abwasserrohre können beschädigt werden (*s. unten stehendes Beispiel*). Abwasser sollte also möglichst am Ort seiner Entstehung gereinigt und verwertet werden.

Hier ein Beispiel, das für eine Dezentralisierung spricht: In *DAMASKUS* wird das Abwasser aus allen Teilen der Stadt und aus Teilen der Umgebung gesammelt und zu einer zentralen Kläranlage in Ost-*DAMASKUS* geleitet. Das geklärte Abwasser leitet man zu den östlichen landwirtschaftlichen Gebieten und nutzt es dort zur Bewässerung. Die Bauern in den westlichen Gebieten möchten aber das von ihnen erzeugte und nun geklärte Abwasser zurückgepumpt haben, was technisch möglich, aber unbezahlbar ist. Die Folge davon ist, dass jeden Tag Abwasserentsorgungskanäle zerstört werden, um das noch ungeklärte Abwasser für die Bewässerung im westlichen Gebiet zu nutzen.

Gäbe es kleinere im Lande verteilte Kläranlagen, würde es zu solchen Problemen nicht kommen.



Abb. 8: Absichtlich hergestellter Bruch im Abwasserentsorgungskanal (eigenes Foto)

Zusammenfassung

Erfahrungen, die in Syrien mit zentralen Kläranlagen gemacht werden, zeigen, dass es aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist, weiterhin zentrale Kläranlagen zu bauen, das Abwasser zu vermischen und gemeinsam zu behandeln. Auf jeden Fall sollten Politiker und Bevölkerung Syriens sich Gedanken machen, ob man in Zukunft in Syrien die Abwasserbehandlung mit Hilfe von Kleinkläranlagen, Teichkläranlagen und Pflanzenkläranlagen vorziehen sollte. So könnte das gereinigte Abwasser direkt am Ort genutzt werden, und es könnten wesentliche Folgen der Wasserknappheit vermieden werden. Dezentrale Verfahren zur Abwasserbehandlung stellen in ländlichen Gemeinden und Neubaugebieten eine passende Lösung dar. Dadurch entfallen nicht nur lange Transportwege, es ergeben sich auch neue Behandlungsmöglichkeiten des Abwassers in naturnahen Kläranlagen. Ein weiterer Vorteil dieser Systeme ist, dass sie aus vor Ort vorhandenen Materialien gebaut und mit lokalen Kräften in Betrieb gehalten werden können.

5. Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien

Dieser Zusammenhang soll im Folgenden am Bau der Kläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* beschrieben werden, deren Planung und Realisierung ich geleitet habe. Von dieser Anlage stehen Untersuchungsergebnisse zur Verfügung, die seit Fertigstellung der Anlage erhoben werden.

5.1 Planung

Im Jahr 1996 fertigte ich meine Masterarbeit über „Probleme der biologischen Abwasserklärung in warm-trockenen Klimaten“ an. In dieser Arbeit wird ausgehend von der derzeitigen Situation die Abwasserbehandlung in Syrien diskutiert und aufgezeigt, welche Möglichkeiten der Verbesserung bestehen. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf den möglichen ökologischen und ökonomischen Einsatz von Pflanzenkläranlagen gelegt. Es wurde deutlich, dass es für die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von Pflanzenkläranlagen in Syrien sehr hilfreich wäre, eine Testanlage vor Ort zu bauen.

Durch einen Antrag an die Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) auf Bereitstellung von Sachmitteln konnte die Finanzierung für die technische Ausstattung der Anlage erreicht werden. Im Jahr 1998 gelang es mir durch politische Überzeugungsarbeit und fachliche Information der Verantwortlichen vor Ort, sowie durch Aufklärungsarbeit bei den Behörden, die Baugenehmigung zu erhalten und die Finanzierung sicher zu stellen. Die Anlage wurde auf der Grundlage dieser Planung gebaut und im November 2000 eingeweiht. Anschließend bildete ich das Betreuungspersonal aus.

Bis zum Jahre 2003 begleitete ich den Betrieb der Anlage wissenschaftlich und konnte dabei die Erfahrungen und Messdaten sammeln, die in dieser Arbeit dargestellt werden. Dabei werden für die Auswertung nicht nur die Messdaten des nun etwa dreijährigen Betriebes berücksichtigt, sondern auch die Erfahrungen, die über die sozioökonomischen Rahmenbedingungen und über die weiteren Voraussetzungen für eine er-

folgreiche Übertragung in andere Regionen gesammelt werden konnten.

Die Einbeziehung des sozialen Umfelds ist für das Projekt von besonderer Bedeutung, da die Akzeptanz nicht nur bei den Regierungsstellen, sondern insbesondere in der Bevölkerung entscheidend für einen zukünftigen und dauerhaften Erfolg sein wird.

Diese Arbeit soll damit wichtige Erfahrungen und Daten liefern, die nicht nur für den Bau weiterer entsprechender Anlagen in Syrien eingesetzt werden können. Sie können auch für die gesamte Nahostregion sowie für Länder mit ähnlichen Klimaverhältnissen eine wichtige Anwendungsgrundlage bilden.

5.1.1 Entscheidungskriterien für eine Pflanzenkläranlage

In Syrien gibt es vielerorts verstreut liegende Kleinsiedlungen oder Einzelgebäude, insbesondere in Umgebungen großer Städte wie *DAMASKUS* und *ALEPPO*, weil es da gute Chancen gibt, Arbeit zu finden und es nicht sehr teuer ist, dort zu wohnen (s. *Abb. 6: Bevölkerungsdichte*). Aber es fehlen dort die geeigneten Wasserversorgungssysteme, Entsorgungskanalsysteme und die dazu passenden Kläranlagen. Für eine solche sehr lockere Siedlungsstruktur sind zentrale Abwasserentsorgungssysteme mit technischen Kläranlagen sehr aufwändig. Eine sinnvolle kostengünstige Alternative könnten dezentrale Pflanzenkläranlagen sein. Sie erlauben die Nutzung von Abwässern im Bewässerungsfeldbau, was von sehr großem wirtschaftlichen und ökologischen Interesse ist. Sie sind preiswert zu errichten, weil sie mit Materialien erstellt werden können, die vor Ort vorhanden sind.

Ein wesentlicher Grund für den Bau von Kläranlagen ist, dass ohne eine weitergehende Reinigung des Abwassers pathogene bzw. fakultativ pathogene Keime in die menschliche Nahrungskette gelangen können und unmittelbar Infektionen in der Landbevölkerung hervorrufen. Das heißt, man benötigt eine Abwasserreinigungsmethode, die ein keimminderndes Potenzial besitzt. Im Prinzip können Pflanzenkläranlagen diese Bedingung erfüllen.

Durch die Testanlage sollte geprüft werden, ob Pflanzenkläranlagen diese Erwartungen tatsächlich erfüllen können.

5.1.2 Auswahl des Standortes

Insgesamt wurden etwa 25 Orte in der Umgebung von *DAMASKUS* (*RIF DIMASHQ - Provinz*) besucht, um eine passende Gemeinde für die Einrichtung der vorgestellten Anlage zu finden, für deren Finanzierung ein Antrag an die GTZ gestellt werden konnte. Bei der Suche nach einem geeigneten Ort war es wichtig, dass dort bereits eine Entsorgungskanalisation vorhanden war. Außerdem musste eine ausreichende Fläche für die Anlage vorhanden sein, auf der eine für die zu erwartende Abwassermenge ausreichend große Anlage Platz finden würde. Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben erwies sich die Ortschaft *HARAN AL-AWAMIED* als besonders geeignet.

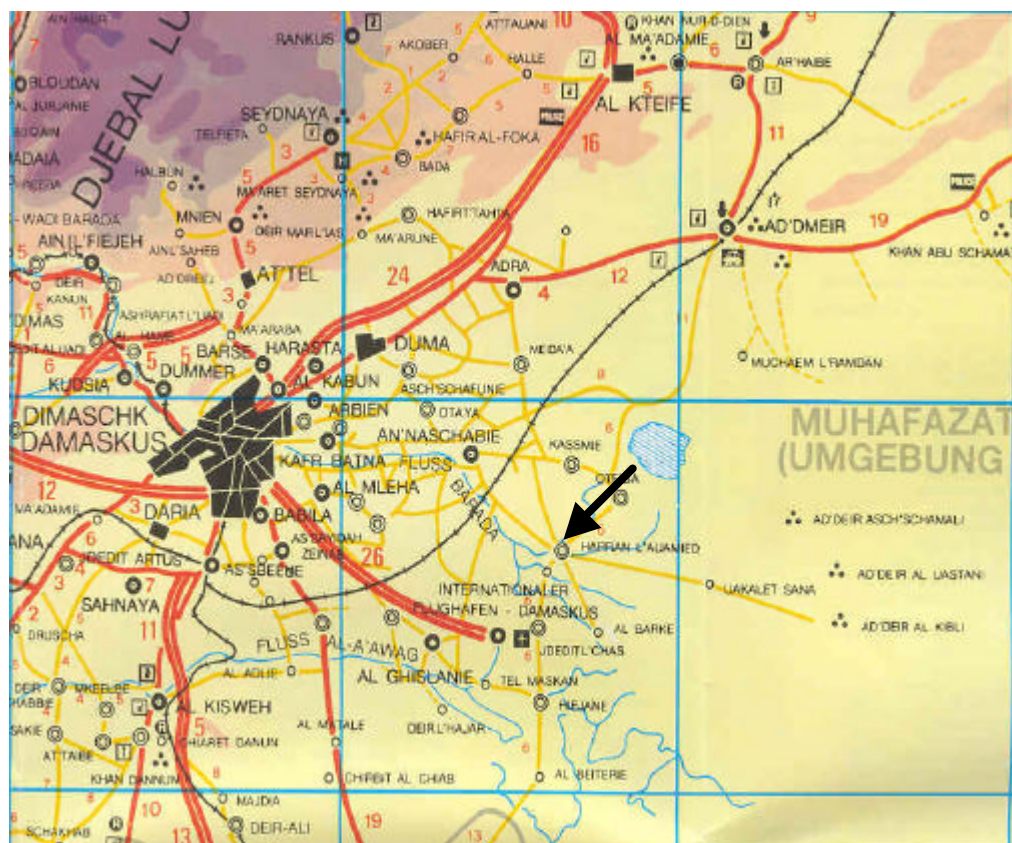


Abb. 9: Die Lage der Ortschaft *HARAN AL-AWAMIED*, s. Pfeil (nach *Tourismus Ministerium 2000*)

Dieser Ort liegt 40 km südöstlich von *DAMASKUS*. Sein Klima ist im allgemeinen trocken, mit heißen langen Sommern und kühlen kurzen

Wintern (Dezember 0 - 6 °C, Juli/August 30 - 35 °C). Regen fällt meist zwischen November und April, der Zeitraum kann aber von Jahr zu Jahr stark variieren. Im Sommer treten oft Dürreperioden auf, und es wehen sehr heiße trockene - *Kamsin* genannte - Winde von der Wüste her. In dieser Region beträgt die Niederschlagsmenge meistens weniger als 180 mm pro Jahr.

Im Klimadiagramm werden die Monatsmittel der Temperatur in Relation zu den monatlichen Niederschlägen gesetzt. Das Verhältnis wird mit 10 °C zu 20 mm Niederschlag so gewählt, dass man Trockenperioden von Feuchtperioden unterscheiden kann: Verläuft die Niederschlagskurve über der Temperaturkurve, überwiegen die Niederschläge die Verdunstung (humides Verhältnis), liegt die Niederschlagskurve unter der Temperaturkurve, so überwiegt die Verdunstung (arides Verhältnis). Für Orte auf der Nordhemisphäre beginnen die Monate auf der Abszisse mit Januar (Walter, H., 1979, S. 28).

Aus dem Klimadiagramm von *HARAN AL-AWAMIED* (Abb. 10) kann man erkennen, dass es eine lange aride Periode von April bis November gibt und dass die potentielle Evaporation die Niederschlagsmenge insgesamt übersteigt.

Berücksichtigt wurden die Mittelwerte der monatlichen Niederschlagsmenge und Temperaturen von 1997-2003.

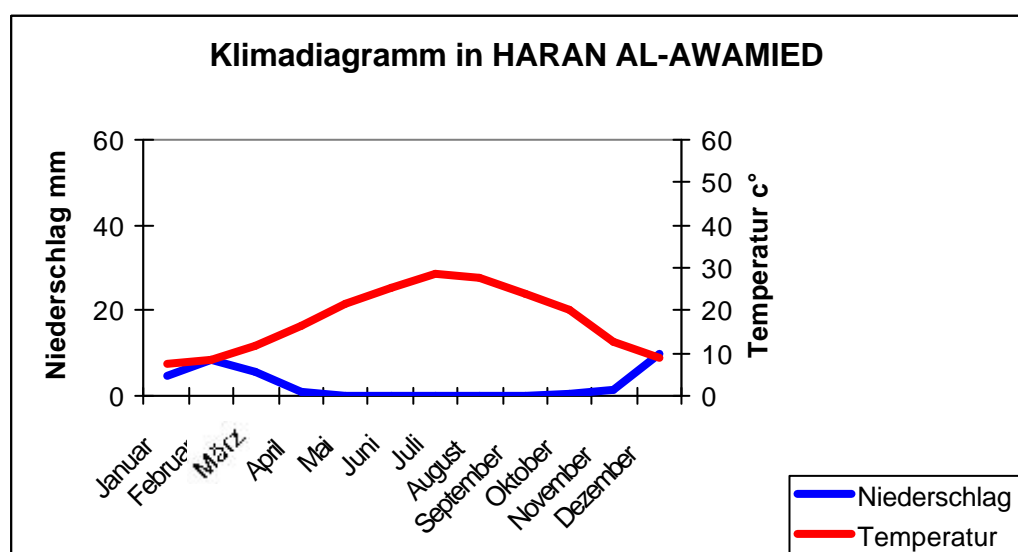


Abb. 10: Klimadiagramm in *HARAN AL-AWAMIED* (Nach Walter, H., 1979)

Die Ortschaft leidet - wie alle Dörfer in der Umgebung von *DAMASKUS* - wegen fehlender Kläranlagen und wegen der Nutzung der ungeklärten Abwässer in der Landwirtschaft unter hygienischen Problemen.

In der Ortschaft *HARAN AL-AWAMIED* sind die Leute allgemein arm, viele verdienen ihr Einkommen in der Landwirtschaft. Die Böden sind sehr fruchtbar, müssen allerdings ständig bewässert werden. Hauptanbauprodukte sind Weizen und Gemüse, sowie Tabak, Oliven und Aprikosen. In der Tierhaltung gibt es Kühe, Ziegen und Geflügel. Einige Bewohner arbeiten in *DAMASKUS* und fahren jeden Tag zur Arbeitsstelle und zurück.

Der Verbrauch in den öffentlichen Einrichtungen des Ortes macht etwa 10% des Gesamtwasserverbrauchs aus. Einige neue Gebäude und Häuser des Ortes sind noch nicht an die Kanalisation angeschlossen.

Tabelle 5: Die Auswirkung auf den Wasserverbrauch durch verschiedene Einrichtungen des Ortes

Aktivität	Zahl	Wasser- verbrauch m³ / Tag	Merkmale
Grundschule	2	4,7	angeschlossen
Höhere Schule	2	3,8	angeschlossen
Technische Schule	1	2	angeschlossen
Apotheke	4	0,8	angeschlossen
Tankstelle mit Wäscherei	2	6	nicht angeschlossen
Schmiede	2	1,8	angeschlossen
Bäckerei	2	2	eine Bäckerei ist nicht angeschlossen
Klein-Imbiss	7	2,8	angeschlossen
Moschee	2	5	angeschlossen, Wasser für die rituelle Waschung / ohne Seife
Polizeiwache	1	0,5	angeschlossen
Gemeindeverwaltung	1	0,3	angeschlossen
Kulturzentrum	1	0,2	nicht angeschlossen
Ambulante Behandlungsstation	1	1	angeschlossen, keine Operationsstation
Landwirtschaftliche Verwaltung	1	0,2	angeschlossen

5.1.4 Vorüberlegungen für den Bau der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED*

Bevor diese Anlage gebaut wurde, musste bedacht werden, was nach der Reinigung mit dem Abwasser geschehen soll: Wird die Anlage nur dazu dienen Abwasser zu reinigen, oder sollte das geklärte Abwasser auch zu Bewässerungszwecken genutzt werden?

Da das Gebiet, in dem die Anlage liegt, an Wassermangel leidet, lag es nahe, das Abwasser für Bewässerungszwecke zu nutzen. Man kann das Abwasser des Dorfes sogar als ein Wirtschaftsgut bezeichnen, da es Dünger enthält. Die Bewässerung mit Abwasser erspart also auch den Kauf von Kunstdünger. Dieser Gesichtspunkt erleichterte es, den Bau der Anlage durchzusetzen und die Akzeptanz der Bewohner der Ortschaft zu gewinnen.

Danach stellte sich die Frage, wie weitgehend das Abwasser gereinigt werden muss. Substanzen, wie z. B. *Phosphor- und Stickstoffverbindungen*, die als Nährsalze bezeichnet werden, sind in gewissem Maße als Düngemittel erwünscht, müssen also nicht komplett entfernt werden. Dadurch wird Geld und Energie gespart, denn um 1 kg Ammonium im HABER- BOSCH- Verfahren zu produzieren, braucht man etwa 1,5 Liter Erdöl (ATV-DVWK, 2001).

Um hygienischen Problemen aus dem Wege zu gehen, verfügte das Landwirtschaftsministerium eine Anbaubeschränkung für roh verzehrbare Pflanzen. Daher wird das geklärte Abwasser nur für die Bewässerung folgender Anbauflächen genutzt:

- Anbau von Futterpflanzen für die Viehzucht,
- Anbau von Baumkulturen, Blumen und Nutzholz,
- Anbau von Getreide und von Pflanzen, die von Menschen nur gekocht gegessen werden.

(Landwirtschaftsministerium, 2000)

Bei der Planung der Pflanzenkläranlage mussten außerdem folgende Daten ermittelt werden:

Abwassermenge

Von den rund 7000 Einwohnern von *HARAN AL-AWAMIED* sind etwa 80% an die Abwasserkanalisation angeschlossen. Durch das ungleichmäßige Wasserangebot in der Region schwankt aber die Abwassermenge zwischen 250 m³ pro Tag im Sommer und 300 m³ im Winter, also etwa 36 - 44 l pro Person und Tag. Der höchste Wasserverbrauch tritt im Dorf um die Mittagszeit auf.

Reinigungsziel

Der Vorfluter für die Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* ist das landwirtschaftlich genutzte Gelände. Deshalb dürfen die Werte des Abwassers nach der Reinigung, die in der folgenden Tabelle dargestellt sind, nicht überschritten werden. Diese Werte wurden vom **SASMO** in Zusammenarbeit mit dem Landwirtschaftsministerium, Gesundheitsministerium, Bewässerungsministerium, Umweltministerium und Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen festgelegt und genehmigt:

Tabelle 6: Richtlinie der geklärten Abwassernutzung in der Landwirtschaft

Abwasser Parameter	Maximale Ablaufkonzentration		
	I Gemüse zum Kochen, Sportrasen	II Fruchtbäume, Futterpflanzen, Getreide	III Waldbäume, Industrielle Ernte
pH-Wert	6-9		
BSB ₅	30 mg/l	100 mg/l	150 mg/l
CSB	75 mg/l	200 mg/l	300 mg/l
Ammonium NH ₄ -N	3 mg/l	5 mg/l	- mg/l
Nitrate NO ₃ -N	20 mg/l	25 mg/l	25 mg/l
Nitrit NO ₂ -N	<1	<1	<1
Sulfate SO ₄ ²⁻	300 mg/l	500 mg/l	500 mg/l
Cyanid CN	0,05 mg/l	0,05 mg/l	0,05 mg/l
T.D.S.	1500 mg/l	1500 mg/l	1000 mg/l
S.S.	50 mg/l	150 mg/l	150 mg/l
Phosphate PO ₄ -P	20 mg/l		
HCO ₃	520 mg/l		
Chlorid Cl	350 mg/l		
Öle und Fette	5 mg/l		
Phenol	0,002 mg/l		
Magnesium Mg	60 mg/l		
Natrium Na	230 mg/l		
Calcium Ca	400 mg/l		
Pathogene Keime	Zahl		
Fäkalkeime pro 100 ml	<1000	<100000	10000 ⁶
Wurm- Eier	<1Ei/l	<1Ei/l	<1Ei/l
Metalle (einschl. Schwermetalle)	Dauernd bewässert	Maximal 20 Jahre	
Aluminium Al	5 mg/l	20 mg/l	
Eisen Fe	5 mg/l	20 mg/l	
Kupfer Cu	0,2 mg/l	5 mg/l	
Chrome Cr	0,1 mg/l	1 mg/l	
Cadmium Cd	0,01 mg/l	0,05 mg/l	
Cobalt Co	0,05 mg/l	5 mg/l	
Nickel Ni	0,2 mg/l	2 mg/l	
Blei Pb	0,5 mg/l	0,5 mg/l	
Zink Zn	2 mg/l	10 mg/l	

(SASMO, 2003)

⁶ Bei dieser Angabe handelt sich möglicherweise um einen Druckfehler in der Originalquelle

Berücksichtigung örtlicher Bedingungen

Die Teile der Anlage waren im Gelände so anzuordnen, dass der Flächenbedarf möglichst gering ist. Außerdem mussten alle Leitungen möglichst kurz und ohne Richtungsänderungen angelegt sein. Über mehrere Wege sind alle Anlagenteile erreichbar. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Anlage beispielweise mit Pflanzbeeten zu erweitern.

Das Abwasser wird in der öffentlichen Kanalisation des Dorfes gesammelt. Da das Gelände, in dem das Dorf liegt, ein leichtes Gefälle hat, leitet man das Abwasser dem natürlichen Gefälle folgend einem Tank zu. Auch der Wasserablauf von Pflanzbeete folgt dem vorhandenen Gefälle. Um Geruchsbelästigungen zu vermeiden, wurde zwischen der Anlage und dem nächsten bewohnten Gebäude ein Abstand von mindestens 25 m eingehalten. Da die lockere Bodenschicht in *HARAN AL-AWAMIED* nur 50 cm tief ist und sich darunter schwer bearbeitbares Gestein befindet, wurde die nötige Gesamttiefe durch die Aufschüttung eines Erdwalls hergestellt.

Erfassung der Abwasserparameter

Das Abwasser im Dorf besteht aus häuslichem Abwasser. Um die Verschmutzungsparameter zu bestimmen, wurden zwei Proben im Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen analysiert.

Tabelle 7: Werte der Abwasseranalyse in *HARAN AL-AWAMIED*

Parameter	02.07.1997	07.08.1997
pH-Wert	7,32	7,5
CSB	330 mg/l	400 mg/l
BSB ₅	220 mg/l	320 mg/l
NH ₄ -N	76,3 mg/l	140 mg/l
NO ₂ -N	0,2 mg/l	0,3 mg/l
NO ₃ -N	25 mg/l	22 mg/l
PO ₄ -P	22,2 mg/l	21,3 mg/l
S.S	130 mg/l	201 mg/l

5.2 Bestandteile der Anlage

Die Anlage besteht aus einer mechanischen Vorreinigungsstufe und einer biologischen Reinigungsstufe.

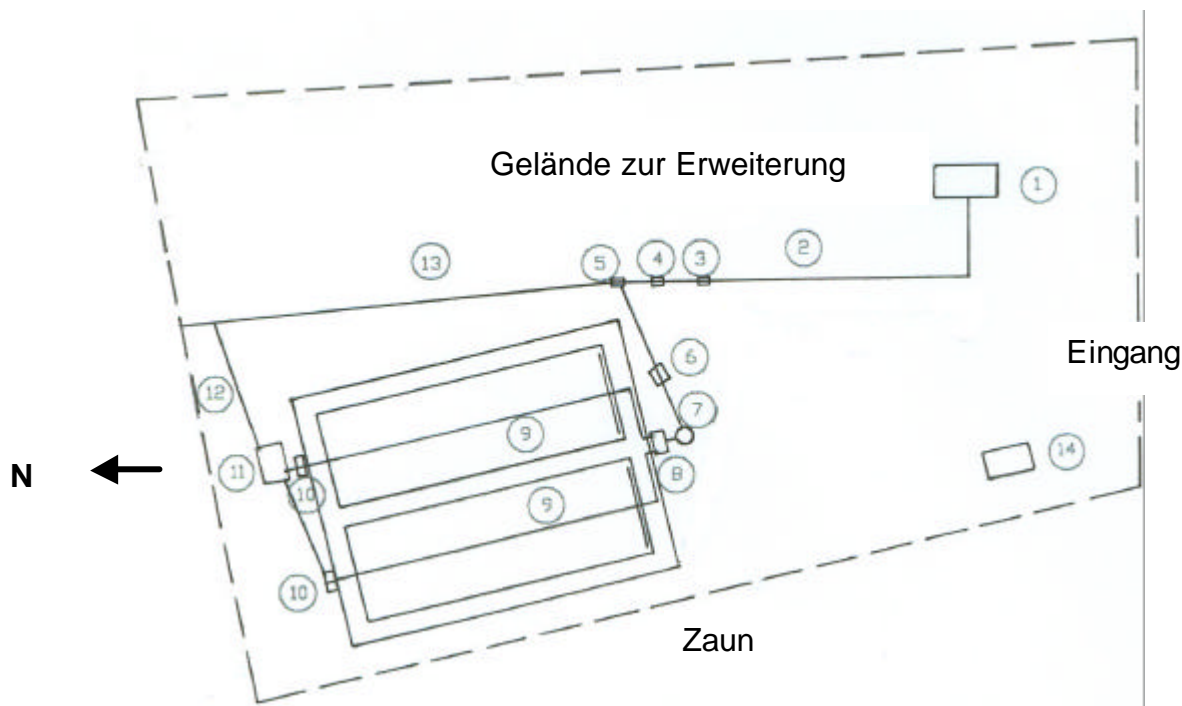


Abb. 11: Bauplan der Anlage (eigene Zeichnung)

Legende:

- | | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| 1: Sammel-tank | 8: Pumpschacht |
| 2: Beschickungskanal | 9: Pflanzbeete |
| 3: Sandfang | 10: Regulierungsschacht |
| 4: Rechen | 11: Sammel-tank (gekl. Abwasser) |
| 5: Verteilungsschacht | 12: Abwasserleitung (gekl. Abwasser) |
| 6: Schwebstofffang | 13: Überlaufkanal |
| 7: Absetzbecken | 14: Betriebsgebäude und Labor |

5.2.1 Mechanische Vorreinigung⁷

Pflanzbeete vertragen wegen der Verstopfungsgefahr keine Feststoffe wie Sand und Papier. Deshalb muss eine mechanische Vorreinigung vorgeschaltet werden. Das Abwasser wird durch eine mehrstufige mechanische Vorreinigung geleitet, um die absetzbaren Stoffe und Schwebstoffe zurückzuhalten. Damit wird eine langfristig ausreichende

⁷ Die Rechen, Absetzbecken und Schwebstofffang wurden nach den Vorschriften des Ministeriums für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen berechnet

Durchlässigkeit der Pflanzbeete garantiert, und die Löcher in den perforierten Dränagerohren bleiben offen.

Das Abwasser wird in einem Tank gesammelt, der bei 6 m Durchmesser und 10 m Tiefe einen Inhalt von etwa 282 m³ besitzt. Dieser Pufferraum sorgt dafür, dass Schwankungen im Abwasserzufluss ausgeglichen werden können. Das Abwasser wird mit einer Zerkleinererpumpe gefördert und durch einen Kanal (Maße: 30 m · 0,6 m · 0,6 m) transportiert.

Tank und Kanal waren schon vorhanden. Der Tank wurde benutzt um das Abwasser zu sammeln und durch den Kanal auf die Ackerflächen zu bringen.

Im Einzelnen besteht die mechanische Vorreinigungsstufe aus folgenden Elementen:

Rechen: Nach den Vorschriften des Ministeriums für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen wurden im Beschickungskanal drei Rechen hintereinander angeordnet: Stabrechen mit 10 mm Stababstand, mittelfeines Sieb mit 6 mm und feines Sieb mit 4 mm Durchmesser der Löcher. Die Rechen werden zweimal pro Tag manuell vom Rechengut befreit. Das Rechengut wird von der Gemeindeverwaltung mit dem Abfall des Dorfes gesammelt.

Die Rechengutmenge beträgt etwa 1,5 l/EW a (*Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen, 2000*). Als Vergleich ist die Rechengutmenge in Deutschland etwa 3 l/EW·a (*Bischof, W., 1993, S. 338,*). Der Unterschied beruht darauf, dass in Syrien kein Toilettenpapier in das Abwasser gegeben, sondern mit dem Abfall der Ortschaft gesammelt wird. Für das Dorf beträgt die Rechengutmenge etwa 10,5 m³/a.

Sandfang.⁸ Das Abwasser der Ortschaft wird in einem Mischsystem abgeleitet. Deswegen ist ein Sandfang erforderlich. In ihm wird die Fließgeschwindigkeit des Abwassers vermindert, so dass Sand und an-

⁸ Der Sandfang wurde nach, *Bischof, W., 1993* berechnet.

dere körnige Stoffe absinken können. Die Fließgeschwindigkeit soll nicht mehr als 0,3 - 0,6 m/s betragen (*Bischof, W., 1993, S. 338*).

Berechnung der Sandfangdimensionen nach (*Bischof, W., 1993, S. 342*) für 7000 Einwohner bei einem Abwasseranfall pro Person und Tag von $\cong 44 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$:

$Q_d = \text{Abwassermenge pro Tag } \text{m}^3/\text{d}$

$Q_d = \text{Einwohnerzahl} \cdot \text{Wasserverbrauch pro Einwohner und Tag}$

$Q_d = 7000 \cdot 44 / 1000 \text{ m}^3/\text{d} \sim 300 \text{ m}^3/\text{d}$

Den Berechnungen wurde 1/14 des 24-stündigen durchschnittlichen Abwasserabflusses (Q_{14}) zugrunde gelegt.

$Q_{14} = Q_d/14$

$Q_{14} = 300/14 = 21,42 \text{ m}^3/\text{h} = \mathbf{5,95 \text{ l/s}}$

Für die Sandfanglänge L wird gefordert, dass sich Sand mit 0,1 mm Korndurchmesser noch absetzt, wenn die Sinkgeschwindigkeit $v_s = 24 \text{ m/h}$ beträgt (*Bischof, W., 1993, nach Tafel 338.1, S. 338*). Daraus berechnet man die Sandfangoberfläche:

$O_{14} = Q_{14}/v_s = (21,42/24) (\text{m}^3/\text{h})/(\text{m/h}) = \mathbf{0,89 \text{ m}^2}$

Der Sandfang ist ein umgebauter Teil des Kanals, das heißt: $b = 0,6 \text{ m}$.

Damit gilt: $L = O_{14}/b = 0,89/0,6 (\text{m}^2/\text{m}) = \mathbf{1,4 \text{ m}}$.

Der Sandfang wurde mit einer Länge von etwa 2 m eingerichtet.

Am Ende des Beschickungskanals befindet sich ein Verteilungsschacht mit drei Ausläufen: Auslauf 1 führt zur vorhandenen Anlage, Auslauf 2 führt zum Überlaufrohr von 40 cm Durchmesser, um die Pflanzbeete bei starkem Regen vor Überflutung zu schützen, und Auslauf 3 ermöglicht eine zukünftige Erweiterung der Anlage (s. *Abb. 11*).

Schwebstofffang: Er besteht aus einem rechteckigen Behälter (3,2 m · 1,5 m · 2 m) mit Trennwand und befindet sich 2,2 m vom Ablauf entfernt. Das Abwasser fließt von einer Seite zur anderen durch drei Rohre (6 Inch), die in einer Höhe von 0,5 m in der Trennwand fixiert sind. Mit Hilfe der Trennwand werden die Schwebstoffe zurückgehalten und mit

einem Sieb manuell gesammelt. Gemeinsam mit dem Rechengut werden die gesammelten Schwebstoffe zur Abfalldeponie des Dorfes transportiert.

Absetzbecken: Das Absetzbecken besteht aus einem runden Trichter mit 5,8 m Durchmesser und einer gesamten Tiefe von 5,5 m.

Es wird vertikal durchflossen. Hier werden die flockigen und körnigen Bestandteile des Abwassers zurückgehalten. Sie setzen sich unten im Schlammraum ab. Den Schlamm entleert man zweimal am Tag durch ein Saugrohr (korrespondierendes Prinzip) in einen Sammelbehälter. Dabei nutzt man den Druckunterschied zwischen Wasserspiegel und Schlamm Spiegel.

Die Dimension des trichterförmigen Absetzbeckens richtet sich nach der Vorschrift des Ministeriums für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen.

Gegeben:

Durchflusszeit $t = 2,5 \text{ h}$

Flächenbeschickung $q_A = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$

Durchmesser des Trichterbeckenbodens $D_1 = 0,5 \text{ m}$

Neigungswinkel des Trichters 60°

Abwassermenge $Q = 300 \text{ m}^3/\text{d}$

$Q_{14} = Q/14 = 300 \text{ m}^3/14 \text{ h} = 21,42 \text{ m}^3/\text{h}$

Volumen des Absetzbeckens $V = t \cdot Q_{14} = 2,5 \text{ h} \cdot 21,42 \text{ m}^3/\text{h} = 53,55 \text{ m}^3$

$V_1 =$ Volumen des trichterförmigen Teils des Beckens

$V_2 =$ Volumen des Oberteils des Beckens

$V = V_1 + V_2 = 53,55 \text{ m}^3$

$D_2 =$ Durchmesser des oberen Teils,

$A_2 =$ Oberfläche des oberen Teils

$q_A = Q_{14}/A_2 \Rightarrow A_2 = Q_{14}/q_A \Rightarrow D_2^2 = 4 \cdot 21,42/0,8 \cdot 3,14 \text{ m}^2 \Rightarrow D_2 = 5,8 \text{ m}$

Neigungswinkel ist $60^\circ \Rightarrow \tan.60 = h_1/(D_2 - D_1)/2 \Rightarrow h_1 = \tan.60 \cdot (5,8 - 0,5)/2 \text{ m} = 1,73 \cdot 2,65 \text{ m} = 4,5 \text{ m} \Rightarrow$

Trichtertiefe $h_1 = 4,5 \text{ m}$

Trichterteilvolumen V_1

$$V_1 = 1/12 \pi \cdot h_1 \cdot (d_1^2 + d_2^2 + d_1 \cdot d_2)$$

$$V_1 = 1/12 \cdot \pi \cdot 4,5 \text{ m} \cdot (0,5^2 \text{ m}^2 + 5,8^2 \text{ m}^2 + 0,5 \text{ m} \cdot 5,8 \text{ m}) = 43,32 \text{ m}^3$$

$$V = V_1 + V_2 = 53,55 \text{ m}^3$$

$$V_2 = V - V_1 = 53,55 \text{ m}^3 - 43,32 \text{ m}^3 = 10,23 \text{ m}^3$$

$$h_2 = 4 \cdot 10,23 \text{ m}^3 / \pi \cdot 5,8^2 \text{ m}^2 = 0,38 \text{ m}$$

Für die Klarwasserzone wurde $h_2 = 1 \text{ m}$ gebaut

Das Abwasser fließt durch die Überlaufrinne in einen Tank (4 m · 2,5 m · 3 m) und wird dort gesammelt.

5.2.2 Biologische Reinigung, Pflanzbeete⁹

Nach der mechanischen Vorreinigung läuft das Abwasser im freien Gefälle in den Beschickungspumpschacht. Aus diesem Schacht wird das Abwasser durch zwei Pumpen in die parallel zueinander angelegten Pflanzbeete geschickt.

Das Abwasser wird den Beeten periodisch zugeführt, wobei die Beete abwechselnd beschickt werden.

Wir (mein Betreuer und ich) entschieden uns für ein Vertikaldurchströmungsbeet, weil bei diesem Typ der Flächenbedarf geringer ist als bei einer Horizontaldurchströmung. Die Anlage besitzt zurzeit zwei Pflanzbeete mit den Maßen 68,2 m · 22,2 m · 1,5 m. Die abgeschrägten Seitenwände haben ein Gefälle von 45%, der Boden besitzt in Längsrichtung ein Gefälle von ca. 0,3%.

Die Pflanzbeete sind nach unten hin sowie an den Seiten mit 1 mm starker, wurzelfester und UV-beständiger PVC-Folie abgedichtet. Die Folie wurde mit geeigneten Klebemitteln und heißer Luft vor Ort mit Sorgfalt zusammengefügt. Damit wird das Abwasser im Beet zusammengehalten und das Grundwasser geschützt.

⁹ Die Pflanzbeete wurden nach der Empfehlung der ATV (ATV, A - 262, 1998) gebaut.

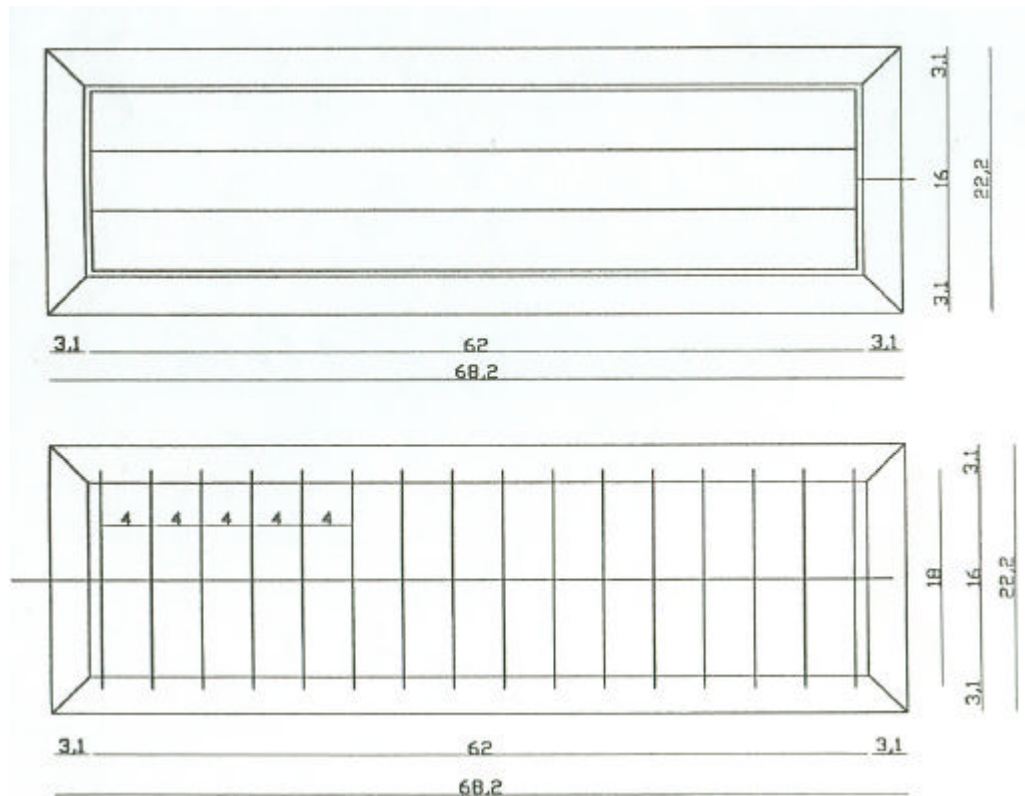


Abb. 12: Pflanzbeete

Bei der Ermittlung der Auslegung des Filterkörpers sowie des Bodenmaterials richteten wir uns zunächst nach dem Arbeitsblatt A-262 der abwassertechnischen Vereinigung (ATV). Nach dieser Empfehlung beträgt die erforderliche Beetfläche bei vertikaler Durchströmung mindestens $2,5 \text{ m}^2 / \text{EW}$. In den trockenen heißen Sommern könnte jedoch bei zu geringem Wassernachlauf die Gefahr der Versalzung bestehen. Deshalb reduzierten wir diesen Wert drastisch auf $0,5 \text{ m}^2 / \text{EW}$. Wir entschlossen uns zudem für diesen deutlich niedrigeren Wert, weil die pro Einwohner anfallenden Abwasserzahlen mit weniger als 50 l/d mehrfach geringer sind als in Mitteleuropa (*Wissing, F., 1995, S. 10*). Die Auswertung der ersten Betriebsjahre sollte zeigen, ob sich diese Dimensionierung bewährt.

Bauaufsicht: Die Bauüberwachung war bei der Herstellung dieser Anlage von großer Bedeutung, da in Syrien zum erstenmal eine solche Anlage errichtet wurde.

Ich führte die Bauleitung, insbesondere bei der Auslegung der Dränage und dem Aufbau der Pflanzbeete selbst durch. In der Ausschreibung

wurden insbesondere die Eigenschaften des Filtersubstrates und die Einbaubedingung genau definiert. Besonderes Augenmerk wurde auf die Basisabdichtung und die Einrichtung der Filterschichten gelegt.

Bei der Verlegung der Dränage wurde ein bestimmtes Gefälle eingestellt. Beim Aufbau der Filterschichten war darauf zu achten, dass der Filter nicht mit schwerem Gerät befahren wurde, um eine Verdichtung zu vermeiden.

Filtermaterial: Der Beetfilter setzt sich aus drei Schichten zusammen. Die obere Schicht besteht zu etwa 35 cm aus Kies (8 -10 mm), in dem die Verteilungsdränage verläuft.

Die mittlere Reinigungsschicht besitzt eine Höhe von etwa 70 cm und besteht aus Sand, der nach der Empfehlung der ATV (ATV, A - 262, 1998) gesucht wurde.

Die untere Schicht besteht aus 35 cm Kies (16 mm, 14 - 12 mm, 8 - 10 mm und 1 - 2 mm). Sie wurde nacheinander stufenweise aufgebaut, um die Vermischung der Sandschicht mit den Kiesschichten zu vermeiden. In der unteren Kiesschicht wurde eine Dränage verlegt, in der das gereinigte Abwasser gesammelt und abgeleitet wird.

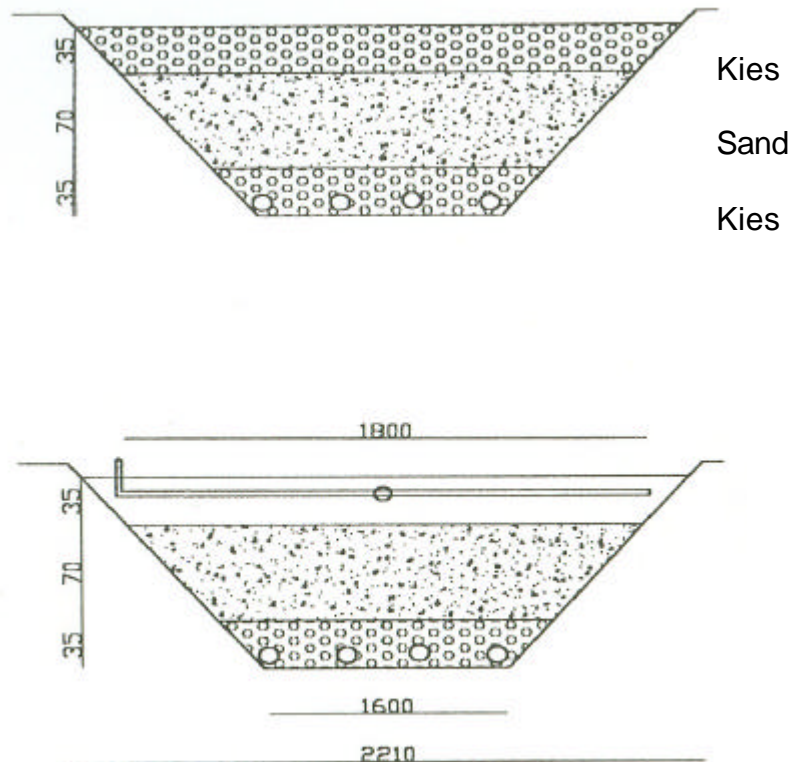


Abb. 13: Filterschichten im Pflanzbeet

Es musste gewährleistet sein, dass der verwendete Sand nicht zu fein und nicht zu grob war; auch der Tongehalt des Sandes sollte nicht zu hoch sein. Deshalb wurden mit einer einfachen Handprobe fünf verschiedene Sandsorten geprüft. Danach kamen davon nur zwei in Frage. Diese Proben wurden der Universität *DAMASKUS* zur weiteren Untersuchung geschickt. Die Untersuchung der Körnung erfolgt über die Siebung der Sandsorten. Mit Hilfe der Körnungslinie wurde der am besten geeignete Sand ausgewählt.

Das durch Abbauprozesse aus organischen Stoffen und aus Waschmitteln u.ä. freigesetzte Phosphat bildet im Pflanzenbeet mit Substanzen wie Eisen, Aluminium und Kalzium Komplexe, die im Boden zurückgehalten werden. Ein Teil des Phosphats wird durch Schilf aufgenommen. Die Phosphor-Elimination hängt vom eingesetzten Filtermaterial ab. Um Phosphor weitergehend zu eliminieren, wird Sand mit hohem Eisen-, Kalzium- und Aluminiumgehalt verwendet.

Tabelle 8: Untersuchung des verwendeten Sandes

Element	Gehalt in P.P.M.
Eisen / Fe	928,5
Kalzium / Ca	40
Aluminium / Al	1,05
Kupfer / Cu	1,56
Zink / Zn	4,07
Mangan / Mn	9,7
Weitere Schwermetalle	Keine Spuren

(Landwirtschaftsministerium - Management und Forschungsabteilung für Natur Ressourcen, 1999).

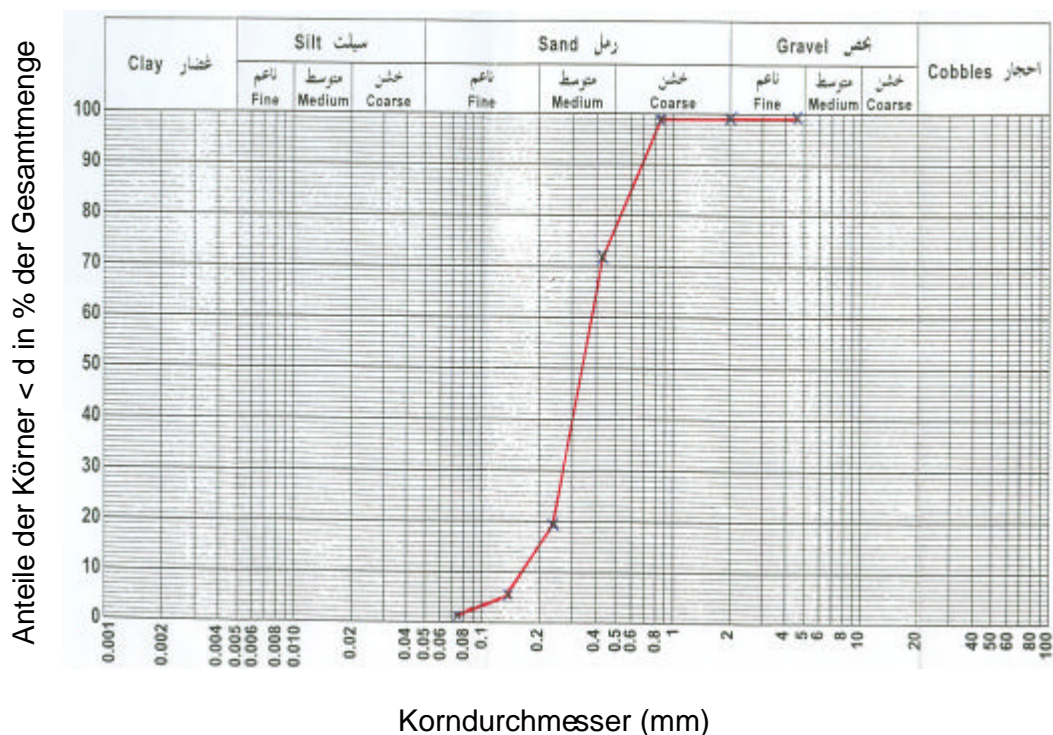


Abb.14: Körnungslinie des genutzten Sandes (Untersuchung an der DAMASKUS Universität, 1999)

Nach einem Vergleich mit der Empfehlung des ATV-262-Arbeitsblatts wurde die Sandsorte mit den folgenden Daten ausgewählt:

Korngröße $d_{10} = 0,17$ mm beim Durchgang der Körnungslinie bei 10% der Gesamtmenge.

Korngröße $d_{60} = 0,39$ mm beim Durchgang der Körnungslinie bei 60% der Gesamtmenge.

Beide Werte bestimmen wesentlich die Wasserdurchlässigkeit des Sandes und dienen zur Berechnung der Ungleichförmigkeitszahl U.

Durchlässigkeitsbeiwert (K_f - Wert)

$$K_f \text{ (m/s)} = (d_{10})^2/100 = (0,17)^2/100 = 2,89 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Nach der Empfehlung der ATV soll der Durchlässigkeitsbeiwert K_f im Bereich 10^{-4} bis 10^{-3} m/s liegen.

Die Ungleichförmigkeitszahl wird berechnet:

$$U = d_{60}/d_{10} = 0,39/0,17 = 2,3$$

Nach der Empfehlung der ATV muss der Ungleichförmigkeitsgrad $U \leq 5$ sein.

In der Sandschicht werden die gewässerbelastenden Stickstoffverbindungen, Phosphate und organischen Schadstoffe des Abwassers gebunden und durch Mikroorganismen abgebaut. Schwermetalle werden zurückgehalten. Das geklärte Abwasser wird filtriert und versickert. Um die Eigenschaft des Phosphatrückhalts zu verbessern, wurden 0,5 t Eisenspäne pro Beet zugegeben.

Dränage: Die Beschickung sollte so erfolgen, dass möglichst das gesamte Pflanzenbeet genutzt werden kann, daher ist eine Verteilungsdränage erforderlich. Die Beschickungsdränage wurde in der oberen Kiesschicht in etwa 10 cm Tiefe verlegt. Sie sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Abwassers. Die Hauptverteilerleitung (6 Inch Durchmesser, Kunststoff) verläuft in der Mitte des Beets, davon zweigen jeweils 16 perforierte Beschickungsrohre (Kunststoff mit 3 Inch Durchmesser) im Abstand von 4 m und einer Gesamtlänge von 16 m ab.

Um die Austrocknung der Beetkanten zu vermeiden, wurde die erste Hälfte der Beschickungsrohre mit 4 mm starken Löchern und die andere Hälfte mit 8 mm starken Löchern versehen. Um eine Verstopfung zu verhindern, wurden die Rohre auch auf der Oberseite perforiert. Die seitlichen Enden der Dränage sind so konstruiert, dass die Möglichkeit besteht, sie zu lüften und zu säubern.

Das geklärte Abwasser wird in vier perforierten (8 mm) Dränagerohren (6 Inch Durchmesser, Abstand 4 m) nach Durchlaufen des Bodenfilters gesammelt und über den Regulierungsschacht abgeleitet. Die Anzahl der Beschickungsvorgänge ergibt sich aus der anfallenden Abwassermenge und der gewählten Länge der Beschickungspumpintervalle.

Pflanzen: In der Umgebung der Kläranlage wachsen Schilf (*Phragmites australis*), Spanisches Rohr (*Arundo donax*), Rohrkolben (*Typha angustifolia*) und Binsen (*Juncus spec.*). Für die Bepflanzung der Pflanzenbeete wählten wir zunächst Schilfpflanzen aus. Hierzu wurden die Setzlinge entnommen und jeweils vier Setzlinge wurden pro Quadratmeter eingesetzt.

Regulierungsschacht: Zu jedem Pflanzenbeet gehört ein Regulierungsschacht mit den Maßen 1,5 m · 1,5 m · 1,7 m, der ein höhenregulierbares Rohr enthält, das am Ablaufrohr des Pflanzenbeets angeschlossen ist. Damit sind Abwasserstand und Aufenthaltszeit im Pflanzenbeet kontrollierbar und regulierbar. Nach Bedarf können damit ab und zu auch Trockenperioden geschaffen werden. Andererseits lässt sich auch durch kurzzeitiges Aufstauen des Abwassers die Oberfläche des Pflanzenbeets überfluten, um ungewünschten Pflanzenwuchs zu vernichten.

Sammeltank: Um das gereinigte Abwasser in der Landwirtschaft nutzen zu können, wird das Wasser in einem Tank (5 m · 4 m · 4 m) gesammelt. Das geklärte Abwasser wird nach Absprache mit den Bauern abgepumpt und den Feldern zugeführt.

Schlammbehandlungsbeet: Das Beet hat die Maße 20 m · 10 m · 1,8 m und ist mit 1 mm starker PVC-Folie ausgekleidet. Es besitzt 10 cm Neigung (5%) am Boden und 2 m an den Kanten. Das Beet besteht aus drei Schichten: Unten 20 cm Kies (16 mm), dann 20 cm schichtweise Kies der Körnung (1 – 14 mm), darauf folgend 30 cm Sand (0,4 – 0,8 mm) und schließlich 70 cm grober Kies (16 mm).

Die Beschickungsdränage wurde in der oberen Kiesschicht verlegt. Sie sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Schlammes. Die Hauptverteilerleitung mit 6 Inch Durchmesser liegt in der Mitte des Beets. Davon

zweigen jeweils drei perforierte (10 mm starke) Beschickungsrohre mit offenen Enden ab (3 Inch Durchmesser, Abstand 5 m).



Abb. 15: Schlammbehandlungsbeet nach 5 Monaten (eigenes Foto)

Das Beet wurde mit Schilf und Spanischem Rohr bepflanzt (4 Pflanzen pro m²). Schlamm und Abwasser (etwa 10 m³) werden zweimal pro Tag eingeleitet, das Sickerwasser sammelt sich unten in den Sammelrohren und fließt zum Absetzbecken.

Aus der anfallenden Schlammmenge wurde ermittelt, dass das Beet fünf Jahre in Betrieb sein kann. Danach muss es erneuert werden. Der Schlamm kann in der Landwirtschaft genutzt werden.

Zusätzliches: Die Anlage ist durch einen Zaun gesichert, ein Labor und ein Verwaltungsraum wurden eingerichtet.

5.3 Durchführung des Betriebs

In den letzten Jahren hat die Vielfalt an Chemikalien im Haushalt, vor allem durch neue Reinigungsmittel und Putzgewohnheiten, stark zugenommen. Pflanzen und Bakterien sind aber sehr empfindlich gegen harte Chemikalien. Darum ist für den erfolgreichen Betrieb einer Pflanzenkläranlage folgendes zu beachten:

1. Es dürfen keine aggressiven Reinigungsmittel, Hygieneartikel, Öle, auslaufende Medikamente und Lösungsmittel über die Toiletten entsorgt werden. Da die Frauen eine zentrale Rolle bei dem Haushaltmanagement spielen, war es wichtig mit den Frauen des Dorfes zu sprechen, um ihre Aufmerksamkeit auf diese Gesichtspunkte zu lenken.
2. Regelmäßige Pflege und Wartung der Pflanzenkläranlage durch geeignetes Wartungspersonal, das gewisse technische und biologische Grundkenntnisse besitzen muss.

Regelmäßig sind folgende Wartungsaufgaben zu erfüllen:

- Rechen sauber halten (zweimal am Tag),
- mit einem Sieb die Schwimmstoffe sammeln (zweimal am Tag),
- Ein- und Ausschalten der Pumpanlagen nach Plan,
- Schlamm zweimal am Tag abpumpen,
- das geklärte Abwasser nach bestimmtem Plan an die Bauern ableiten,
- Entfernen der Fremdpflanzen in den Pflanzbeeten,
- Beobachtung der Durchlässigkeit der Pflanzbeete,
- einfache Kontrolle des geklärten Abwassers durch Sicht- und Geruchsprobe.

Nach drei Jahren Betriebsdauer im Schlammbeet wird das abgestorbene Schilf und das Spanische Rohr abgeschnitten. Damit soll gewährleistet werden, dass nachwachsende Schilftriebe nicht behindert werden. Über die weitere Nutzung dieser "Rohstoffe" wurden noch keine genaueren Überlegungen angestellt. Doch wäre hier z.B. an folgende Nutzungsmöglichkeiten zu denken: (Baumaterial für Zäune, Feldstöcke für Pflanzenkulturen wie Tomaten und Bohnen o.ä.).

Beschickungsintervalle

Der Abwasserstand wird in den Pflanzbeeten von Zeit zu Zeit verändert, um die Milieubedingungen zu verbessern, damit unterschiedliche Mikroorganismen tätig werden können. Es wird eine Intervallbeschickung empfohlen. Dabei entstehen Trockenperioden, in denen sich im Bodenkörper die Sauerstoffsättigung verbessert, weil Luft durch die Bodenporen gezogen wird. Zur Regelung des Wasserstandes sind im Beschickungstank die Tauchpumpen mit Zeitschaltern verbunden.

Das Abwasser wird achtmal pro Tag zu einer „Schwallbeschickung“ abwechselnd auf jedes Beet geschickt. Die Beschickungsmenge beträgt zwischen 31 - 37 m³ pro Beschickung.

Zusätzlich wird die gesamte Anlage in Zeitabständen von 2 Stunden durch das Betriebspersonal kontrolliert, um Störungen durch Verstopfung der Zu- und Ableitungen oder durch Störungen in den mechanischen oder elektrischen Teilen der Anlage zu verhindern.

CSB = $(400 + 330/2)$ mg/l = 365 mg/l oder g/m³ (s. Tabelle 7)

CSB-Frachtbelastung nach der Vorreinigungsstufe = $(365/3)$ g/m³

~ 121 g/m³ (Die Vorreinigungsstufe der Anlage reduziert die CSB-Frachtbelastung um etwa ein Drittel)

CSB-Frachtbelastung pro Tag = $242 \text{ g/m}^3 \cdot 300 \text{ m}^3/\text{d} = 72600 \text{ g/d}$

Damit beträgt die CSB-Flächenbelastung =

CSB-Frachtbelastung pro Tag / Pflanzbeete Oberfläche = $(72600/3028)$ g/m² · d = 24 g/m² · d.

Die hydraulische Belastung in der Anlage beträgt:

Abwassermenge pro Tag in l/Pflanzbeete Oberfläche

Im Sommer:

$(250 \cdot 1000/3028)$ mm/m² · d = 83 mm/m² · d

Im Winter:

$(300 \cdot 1000/3028)$ mm/m² · d = 99 mm/m² · d

Tabelle 9: Beschickungsschema

	Zeit	Zeitraum der Beschickung von - bis Pflanzenbeet 1	Zeitraum der Beschickung von - bis Pflanzenbeet 2
Erste Schicht	7:30	7:30	
	8:30		8:30
	9:30		9:30
	10:30		10:30
	11:30	11:30	
	12:30		12:30
	12:30 - 12:40	Schlammbeschickung	
	13:30		13:30
	14:30		14:30
	15:30	15:30	
Zweite Schicht	16:30		16:30
	17:30		17:30
	18:30		18:30
	19:30	19:30	
	20:30		20:30
	20:30 - 20:40	Schlammbeschickung	
	21:30		21:30
	22:30		22:30

5.4 Kosten

Die Baukosten einer Pflanzenkläranlage hängen grundsätzlich von der Anzahl der Bewohner und der von ihr erzeugten Abwassermenge ab. Die hier beschriebene Anlage wurde in Zusammenarbeit zwischen der GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit / Deutschland) und dem „Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen in Syrien“ errichtet. Das Geld für den Bau der Anlage wurde in Absprache des Ministeriums für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen mit der Kommission für staatliche Planung zur Verfügung gestellt. Die Gemeinde stellte etwa 12 Hektar kostenlos bereit (Die Anlage ist auf 6 Hektar gebaut. Der Rest ist eingezäunt, um die Anlage eventuell erweitern zu können).

Mit einem Zuschuss der Deutschen Botschaft in *DAMASKUS* wurde das Schlammbehandlungsbeet gebaut.

5.4.1 Herstellungskosten

Die Herstellungskosten einer Pflanzenkläranlage setzen sich aus den Kosten für den Grunderwerb und den Bau der Anlage zusammen. Die

Höhe der Kosten hängt von folgenden Faktoren ab: Benötigte Pflanzenbeetfläche, Bodenstruktur, Geländegestaltung des Ortes und Entfernung zum Steinbruch, von dem die zum Bau erforderlichen Steine und Sand geliefert werden.

Die Baukosten der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* resultieren aus der Herstellung der Vorklärungsstufe, der Pflanzbeete, der Schlammbehandlungsbecken, der technischen und elektrischen Ausrüstung und des Betriebsgebäudes, des Zauns sowie des Labors samt seiner Ausstattung. Der Grunderwerb war kostenfrei.

Im Einzelnen wurde die Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* folgendermaßen finanziert:

- Die GTZ (Gesellschaft für technische Zusammenarbeit) finanzierte die technischen Einrichtungen, die Abdichtungsfolie für ein Beet und die gesamte Laboreinrichtung, die für die Testläufe erforderlich ist.

Tabelle 10: Finanzierung durch die GTZ

Material	Menge	Kosten DM
Baumaterial		
Folie PVC (1mm)	1000 m ²	20.000,00
Tauchpumpe mit Zeitschaltuhr	2	2.540,00
	2	
Laborgeräte		
BSB Messgerät Oxi Top IS-6	1 Komplett	2.622,00
BSB- Thermostatschrank TS 606/2-Var	1 Variabel einstellbar	2.288,50
Photolab S12	1 12 Wellenlängen	5.980,00
Mehrparameter-Messgerät Multiline F/SET-3	1	3.217,70
Thermoreaktor CR 2010/G und Zubehör	1 100°C und 140°C	989,00 86,25
Magnetrührer	1	204,70
Mikroskop	1	3.451,15
Zubehör Kleingeräte Chemikalien		1.992,77 2.561,16
Summe		45.933,23 DM
Syrische Währung		22.966,62 Euro 1.600.000 SP

- Das Land Syrien finanzierte über das „Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen“ das Bau- und das Verbrauchsmaterial. Die Kosten wurden durch meine Berechnungen ermittelt und in der Ausschreibung verwendet. Die Ausschreibung für den Bau der Anlage musste dreimal vorgenommen werden; zweimal ohne Erfolg, weil für solche Anlagen keine Erfahrungen vorhanden waren. Die Preise für das Filtermaterial können örtlich stark schwanken.

Tabelle 11: Förderung durch das Land Syrien

Material	Menge	Kosten SP
Erdaushub	620 m ³	122.221,24
Gestaltung der Beete	5850 m ³	468.000,00
Gestaltung Sammel-tank, Verteilungsschacht	794 m ³	200.000,00
Sand	1625 m ³	487.500,00
Kies	1857 m ³	557.100,00
Folie PVC1mm	1500 m ²	210.000,00
Verteilungsrohre 150mm	511 lfm	86.582,00
100 mm	20 lfm	2.700,00
perforierte Rohre 150mm	1100 lfm	176.000,00
Zubehör		24.880,00
Tauchpumpe (3“)	1	24.000,00
Zubehör		3.500,00
Pflanzen / Pflanzung		100.000,00
Zement, Eisen		
Absetzbecken, Sammel-tank	2	689.307,36
Verteilungsschächte		120.000,00
Regulierungsschacht		
Zubehör		
Transport		10.000,00
Zaun und Eingangtür		438.500,00
Betriebsgebäude und Labor		
Wege		
Einrichtung der Betriebsgebäude		176.590,00
Zementrohr für den Überfluss (400 mm)	1180 lfm	57.230,00
Zementrohr 150 mm	5605 lfm	8.475,00
Elektrizität und Zubehör		93.221,76
Summe		67.596,78 Euro
Syrische Währung		4.055.807,00 SP

- Die Bundesrepublik Deutschland finanzierte das Schlammbehandlungsbecken durch das Förderprogramm *Small Aid Projekts* (s. Anhang 9.1.4) über die Deutsche Botschaft in *DAMASKUS*.

Tabelle 12: Förderung durch die deutsche Botschaft in *DAMASKUS*

Material	Menge	Kosten SP
Kies und Sand	300 m ³	105.000,00
Erdaushub /Gestaltung des Beets		72.000,00
Folie PVC (1mm)	300 m ²	60.000,00
Schlammverteilungsrohre 150mm	50 lfm	14.000,00
100 mm	150 lfm	30.000,00
Zubehör		10.000,00
Tauchpumpe + kleineres Zubehör	1	40.000,00 9.000,00
Pflanzen		10.000,00
Summe Syrische Währung		5.833,33 Euro 350.000,00 SP

Die Gesamtkosten für die Herstellung der Anlage beliefen sich auf 6.005.807,00 Syrische Pfund, damit betragen die Herstellungskosten pro Einwohner etwa 858 Syrische Pfund oder 13,7 Euro/EW (Zum Vergleich: in Deutschland werden 400 – 1.500 Euro/EW berechnet, *Geller, G. und Höner, G., S. 144*). Die Herstellungskosten könnten in verschiedenen Bereichen reduziert werden, aber auf keinen Fall bei der Ausstattung des Pflanzenbeets oder beim Filtermaterial. Kosteneinsparungen wären aber bei der allgemeinen Geländegestaltung möglich (Betriebsgebäude, Zaun, Beleuchtung und die Einrichtung des Betriebsgebäudes).

5.4.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten umfassen die Personalkosten, die Kosten für Wasser- und Stromversorgung und für das Verbrauchsmaterial bei der Abwasseranalyse. Der größte Teil der Betriebskosten entfällt auf die Personalkosten. Zu einem Kostenvergleich zwischen verschiedenen Abwasserreinigungssystemen in Syrien s. Kapitel 6.2.2.

Tabelle 13: Betriebskosten

Betriebskosten	Anzahl	Kosten pro Jahr
Betriebspersonal	3 X 4.900 SP/Monat	176.400,00
Laborant	1 X 5.300 SP/Monat	63.600,00
Wächter	2 X 4.300 SP/Monat	103.200,00
Strom		12.000,00
Wasser		1.000,00
Telefon		6.000,00
Verbrauchsmaterial für die Abwasseranalyse		18.000,00
Summe		6.336,66 Euro/a 380.200,00 SP/a

Die Betriebskosten liegen bei 55 SP/(EW · a) , etwa 1 Euro/ (EW · a).

Als Vergleich können die Betriebskosten in Deutschland mit 13 - 50 Euro / (EW · a) herangezogen werden (Geller, G. und Höner, G., 2003, S. 147).

Der Kostenunterschied zwischen Syrien und Deutschland ist sehr hoch. Dieser entsteht durch die höheren Materialkosten, aber auch durch die vielfach höheren Personalkosten in Deutschland.

5.5 Materialien und Methoden

5.5.1 Abwasser-Untersuchungen an den Pflanzbeeten

Die Untersuchungen an der Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED*, die während des Dreijahresbetriebs durchgeführt wurden, beinhalten die Untersuchungen der Abwässer vor und nach der Reinigung und die Untersuchung des bewässerten Ackerbodens.

Untersucht wurden:

- pH-Wert, Temperatur
- CSB, BSB₅, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N und PO₄-P
- Keime (untersucht vom Ministerium für Wohnungsbau und Öffentliche Einrichtungen)
- Schwermetalle (untersucht vom Ministerium für Wohnungsbau und Öffentliche Einrichtungen)
- Ackerboden, der drei Jahre mit geklärtem Abwasser bewässert wurde (untersucht vom Landwirtschaftsministerium)

Probenvolumen

Zulauf: $V = 2000 \text{ ml}$

Ablauf: $V_1 = 1000 \text{ ml}$ Pflanzenbeet 1

$V_2 = 1000 \text{ ml}$ Pflanzenbeet 2

Probennahme

Die Proben wurden zu unterschiedlichen Tageszeiten entnommen und entweder direkt im Labor der Anlage untersucht oder zum Ministerium für Wohnungsbau und Öffentliche Einrichtungen geschickt.

Die Ermittlung der Zulaufkonzentrationen erfolgte im Zulauf der Pflanzenbeete nach der Vorreinigungsstufe der Anlage. Die Ermittlung der Ablaufkonzentrationen erfolgte im Ablauf der Pflanzenbeete.

Für die Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* sollten die Werte CSB, BSB₅, Ammonium, Nitrit, Nitrat, Phosphat, pH-Wert, Temperatur, Schwermetalle und pathogene Keime überprüft werden, um eine einwandfreie Funktion zu gewährleisten.

Temperatur und pH-Wert wurden mit dem Mehrparameter-Messgerät F/SET-3 gemessen.

Zur Bestimmung des CSB-Gehaltes: Der CSB-Gehalt wurde in Reaktionsküvetten mit den Messbereichen 15 - 300 mg/l und 100 - 1500 mg/l bestimmt.

Die Küvetten wurden gut geschüttelt, es wurde ihnen je 2 ml Probevolumen zugefügt, dann wurden sie 2 Stunden im Thermostat bei 148°C erhitzt und dann auf Raumtemperatur abgekühlt. Anschließend wurden die Werte mit dem Photolab S12 gemessen.

Zur Bestimmung des Nitratgehaltes: Der Nitrat-Gehalt wurde in Reaktionsküvetten mit den Messbereichen 0,5 - 15 mg/l und 1 - 50 mg/l bestimmt.

Es wurde je ein Löffel Reagenz $\text{NO}_3\text{-1K}$ und 2 ml Probevolumen zu den Küvetten hinzugefügt. Die Küvetten wurden gut geschüttelt, dann wurden sie je 15 Minuten stehen gelassen. Anschließend wurden die Wer-

te mit dem Photolab S12 gemessen. Für die Ablaufkonzentrationen wurden die Proben im Verhältnis 1:10 verdünnt.

Zur Bestimmung des Nitritgehaltes: Der Nitrit-Gehalt wurde in Reaktionsküvetten mit dem Messbereich 0,05 - 2 mg/l bestimmt.

Es wurden je 4 ml Probevolumen in die Küvetten gegeben, dann wurden sie gut geschüttelt und nach 10 Minuten wurden die Werte mit dem Photolab S12 gemessen.

Zur Bestimmung des Phosphatgehaltes: Der Phosphat-Gehalt wurde in Reaktionsküvetten mit den Messbereichen 0,05 - 5 mg/l und 0,2 - 15 mg/l bestimmt.

Es wurden 4 ml Probevolumen in die Küvetten geben und je ein Dos Reagenz P-1K. Die Küvetten wurden gut geschüttelt, dann wurden sie 30 Minuten im Thermostat auf 120°C erhitzt und auf Raumtemperatur abgekühlt. Ein Dos Reagenz P-3K und 5 Tropfen Reagenz P-2K wurden zu den Küvetten hinzugefügt. Anschließend wurden sie gut geschüttelt. Nach 5 Minuten wurden die Werte mit dem Photolab S12 gemessen.

Zur Bestimmung des Ammonium-Gehaltes: Der Ammonium-Gehalt wurde in Reaktionsküvetten mit den Messbereichen 0,5 - 16 mg/l und 4 - 80 mg/l bestimmt.

Es wurden je 0,1 ml Probevolumen und ein Dos Reagenz NH₄-1K in die Küvetten gegeben. Die Küvetten wurden gut geschüttelt. Anschließend wurden die Werte nach 15 Minuten mit dem Photolab S12 gemessen.

Zur Bestimmung des BSB₅-Gehaltes: Der BSB₅-Gehalt wurde mit Oxi Top IS/6 (Druckmessungen in einem geschlossenen System) gemessen. Durch die Drehung des Gerätes und durch die Magnetrührstäbchen in der Flasche entstand eine Dauerbewegung der Probe, die einen optimalen Gasaustausch ergab.

Mit dem eingesetzten Probenvolumen können Messbereiche bis zu 4000 mg/l gemessen werden.

Die in der eingesetzten Probe befindlichen Mikroorganismen verbrauchen den Sauerstoff und bilden dabei CO₂. Dieses wird mit 2 NaOH-Plätzchen absorbiert.

Die Probenflächen wurden 5 Tage bei 20°C im Thermostatschrank gelassen. Es entstand so ein Unterdruck, der als Messwert direkt in mg/l BSB abgelesen werden konnte und die Werte wurden mit dem passenden Faktor multipliziert wurde.

Probenvolumen ml	423	365	250	164	97	43,5	23,7
Faktor	1	2	5	10	20	50	100

5.5.2. Geräte und Materialien

Tabelle 14: Geräte und Materialien

Geräte und Zubehör	
BSB Messgerät WTW - Oxi Top IS-6	Messbereich 0 - 4000 mg/l Messwertspeicher 5 Tage Feste Probenvolumina
Photolab S12	WTW - 12 Wellenlängen
Mehrparameter-Messgerät Multi F/SET-3	WTW pH-Wert und Temperatur
Thermoreaktoren CR 2010/G	WTW - 100C° und 148C°
BSB - Thermostatschrank	WTW - TS 606/2-Var Variabel einstellbar 5C° - 40C°
Magnetrührer	MONO - Drehzahlkonstanz
Waage	DURAN
Zeitmesser	DURAN
Pipetten	DURAN - Verschiedene Volumina
Chemikalien	
Reaktionsküvetten WTW	Messbereich ¹⁰
Nitrat NO ₃ -N	0,5 - 15 mg/l und 1 - 50 mg/l
Nitrit NO ₂ -N	0,05 - 2 mg/l
Ammonium NH ₄ -N	0,5 - 16 mg/l und 4 - 80 mg/l
Phosphat PO ₄ -P	0,05 - 5 mg/l und 0,2 - 15 mg/l
CSB	15 - 300 mg/l und 100 - 1500 mg/l

¹⁰ Die Proben wurden in bestimmte Bereiche verdünnt im Verhältnis 1:10.

6. Ergebnisse und Diskussion

Die vorliegende Untersuchung hatte das Ziel zu prüfen, inwieweit Pflanzenkläranlagen für Syrien und vergleichbare Länder eine geeignete Methode der Abwasserreinigung darstellen könnten.

Zunächst war die wichtigste Frage, ob organische Stoffe und Krankheitserreger aus dem Abwasser soweit entfernt werden konnten, dass das gereinigte Abwasser zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Ackerflächen genutzt werden kann. Das Auftreten und die eventuelle Verringerung weiterer belastender und schädlicher Stoffe - wie z.B. von Schwermetallen oder giftigen Kohlenwasserstoffen - wurde ebenfalls geprüft. Da es sich jedoch im vorliegenden Fall um häusliche Abwässer einer ländlichen Region handelt, waren hier keine hohen Ausgangswerte zu erwarten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Ergebnisse des Dreijahresbetriebs analysiert. Dies geschah durch Probenentnahme und Untersuchung des Abwassers vor und nach dem Durchfluss durch die Pflanzbeete.

Das Abwasserablaufgebiet für die Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* ist das landwirtschaftlich genutzte Ackerland des Ortes. Aus diesem Grunde wurden die Ergebnisse der Probenentnahmen mit den von **SASMO** festgelegten Richtlinien für die landwirtschaftliche Nutzung verglichen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit war die Betrachtung der sozioökonomischen Bedingungen und der politischen Gegebenheiten, die, so die These, für die erfolgreiche Planung, den Bau und den Betrieb der Anlage nicht außer Acht gelassen werden durften.

Die Anlage wurde im November 2000 eingeweiht und in Betrieb genommen. Um die Leistungsfähigkeit der Anlage zu beurteilen, wurden Proben zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten gezogen. Da die Untersuchung zur Reinigungsleistung der Pflanzbeete im Mittelpunkt der Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Anlage stehen muss, erfolgten die Probennahmen jeweils im Zu- und Ablauf der Pflanzbeete.

Eine Vorrichtung zur kontinuierlichen, automatischen Probenentnahme stand nicht zur Verfügung.

Die Untersuchungen erfolgten entweder direkt in der Anlage oder beim Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen.

6.1 Ergebnisse, Auswertung und Diskussion der Reinigungsleistung in der Untersuchungsperiode

6.1.1 Temperatur

Die Temperatur hat einen starken Einfluss auf die Aktivität der Mikroorganismen (s. Kapitel 2.2.3), was besonders für die stickstoffoxidierenden Bakterien gilt. Der passende Bereich für die biologische Aktivität der Mikroorganismen liegt zwischen + 5°C und + 30°C.

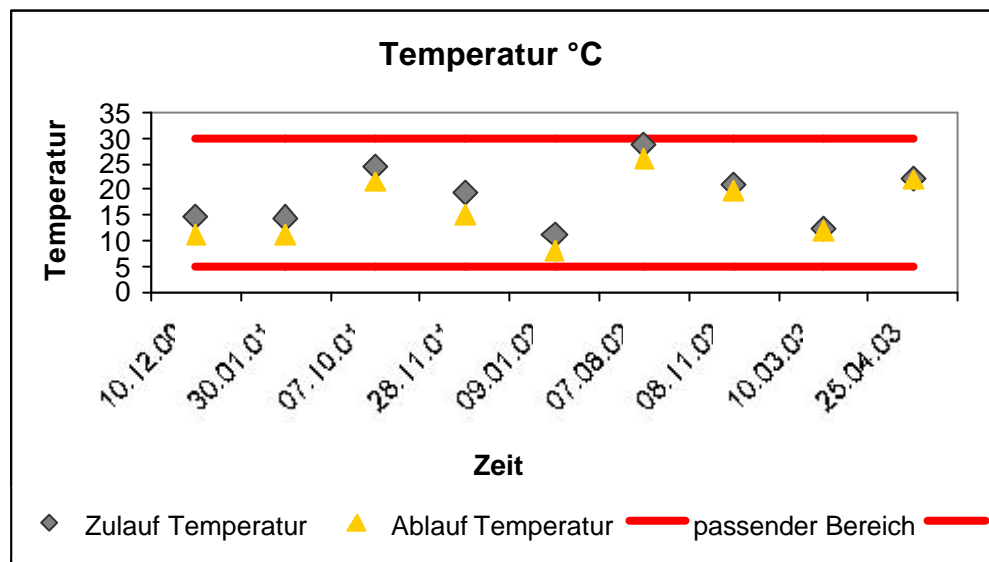


Abb. 16: Abwassertemperatur in Zu- und Ablauf und passender Bereich für die Mikroorganismen.

Es zeigte sich, dass der passende Temperaturbereich das ganze Jahr über weder unter- noch überschritten wurde. Im Gegensatz zu den Verhältnissen in Mitteleuropa bedeutet dies, dass mit einer relativ kontinuierlichen Leistung der Anlage zu rechnen ist.

6.1.2 pH-Wert

Die biologische Abwasserreinigung mittels Mikroorganismen sollte im Bereich von pH 6-9 erfolgen, da außerhalb dieses Bereichs die meisten Mikroorganismen geschädigt oder gar nicht aktiv werden.

Da Ammonium von Wasserpflanzen und Algen direkt aufgenommen wird, im alkalischen Milieu (pH-Wert > 7) verwandelt sich das Ammonium-Ion (NH_4^+) in das für alle Organismen giftige Ammoniak (NH_3).

In der Versuchsanlage lagen die Werte in den drei Jahren des Untersuchungszeitraums konstant zwischen 7,1 - 7,7 (s. Abb. 17), dies ist das optimale pH-Milieu für die relevanten Mikroorganismen. Es entspricht auch dem in der **SASMO-Richtlinie** genannten Bereich (6-9).

Aus diesem Grund war es nicht nötig vor der biologischen Stufe (Pflanzbeete) eine chemische pH-Wert -Regulierung vorzuschalten.

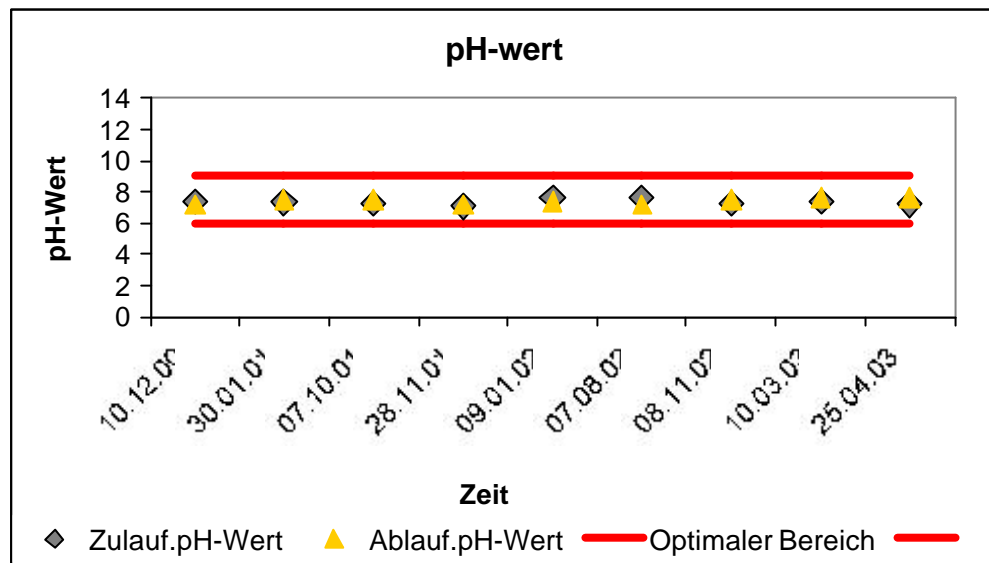


Abb. 17: pH-Werte in Zu- und Ablauf und optimaler Bereich für die Mikroorganismen

6.1.3 Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) und Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB₅)

Der Abbau von organischen Substanzen erfolgte in den Pflanzbeeten stabil und effizient. Das zeigen die Werte für den biologischen Sauerstoffbedarf, BSB₅, und den chemischen Sauerstoffbedarf, CSB, die einen Überblick über die Belastungssituation des Abwassers und über die Effektivität seiner Reinigung geben. Die biologisch gar nicht oder nur schwer abbaubaren organischen Substanzen werden als CSB gemessen.

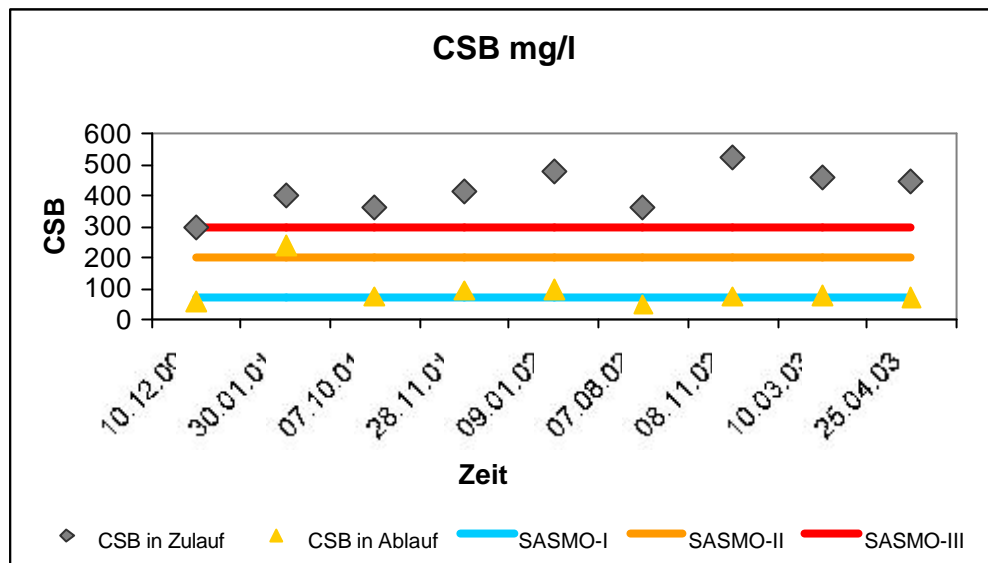


Abb. 18: CSB in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie

Im ersten Jahr entsprachen die gemessenen Werte der CSB im Ablauf den Anforderungen der *SASMO-Richtlinie* II und III. Die Messung am 30.01.2000 erfüllte mit 240 mg/l nur die Richtlinie III.

Im zweiten Jahr zeigten die Untersuchungen des chemischen Sauerstoffbedarfs durchweg einen guten Abbau der organischen Stoffe. Die Werte entsprachen denen der *SASMO-Richtlinie* II und III, und am 07.08.2002 sogar denen der Richtlinie I.

Im dritten Jahr schwankten die Zulaufwerte zwischen 521 mg/l und 446 mg/l, im Ablauf liegen sie zwischen 70 mg/l bis 78 mg/l. Die Abbauleistungen lagen bei 82% bis 85%. Die Werte entsprachen denen der Richtlinie II und III sowie am 25.04.2003 der *SASMO-Richtlinie* I.

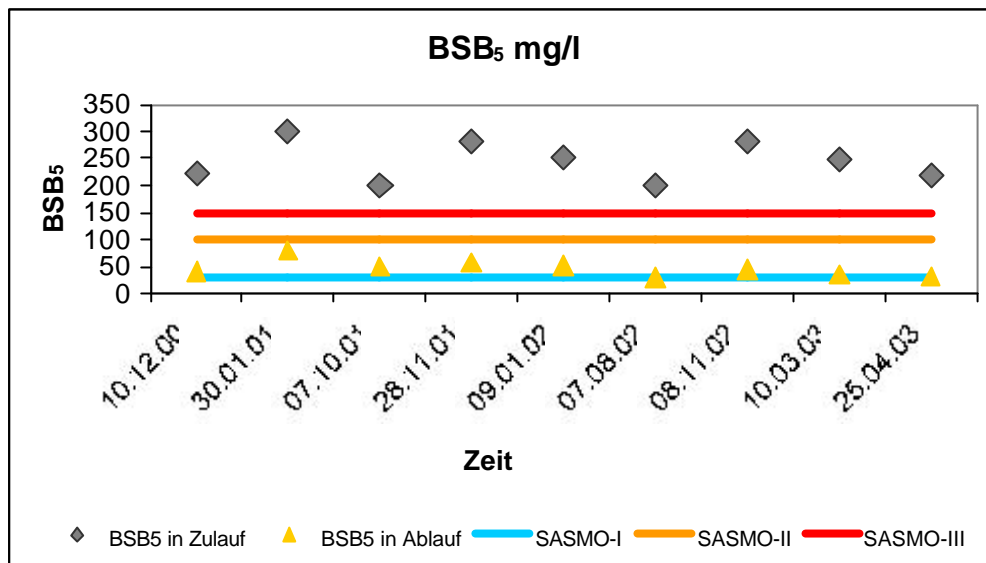


Abb. 19: BSB₅ in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie

Im ersten Jahr zeigte die Anlage eine BSB₅-Abbauleistung von 60% bis 81%. Am Ablauf der Anlage schwankte der biologische Sauerstoffbedarf zwischen 42 mg/l und 80 mg/l. Obwohl der Wert von 80 mg/l relativ hoch ist, erfüllt er noch die Bedingungen der *SASMO-Richtlinie* II und III in Bezug auf gereinigtes Abwasser, das zur Nutzung in der Landwirtschaft verwendet wird.

Im zweiten Jahr lagen die Werte des biologischen Sauerstoffbedarfs im Ablauf der Anlage zwischen 57 mg/l und 52 mg/l. Diese Werte entsprechen denen der *SASMO-Richtlinie* II und III. Am 07.08.2002 erfüllte der Wert des biologischen Sauerstoffbedarfs auch die Richtlinie I.

Im dritten Jahr schwankten die Zulaufwerte zwischen 280 mg/l und 220 mg/l, im Ablauf lagen sie zwischen 45 mg/l und 32 mg/l. Die Werte entsprechen den der *SASMO-Richtlinie* II und III sowie am 10.03.2003 der Richtlinie I.

6.1.4 Ammonium

Der Gehalt an Ammonium sagt etwas über die aerobe biologische Abbauleistung aus. Der Wirkungsgrad der Ammonium-Elimination erreichte im ersten Jahr des Anlagenbetriebs etwa 86%. Im zweiten Betriebsjahr verminderte sich der Wirkungsgrad auf 49%, weil die Schilfpflanzen zum größten Teil nicht angewachsen waren. Sie waren am Anfang zu

lange trocken gefallen, und nach der ersten Wassereinleitung verfaulten die Rhizome. Doch nach dem Anpflanzen neuer Schilfsetzlinge verbesserte sich im dritten Jahr der Pflanzenwuchs, und es steigerte sich der Wirkungsgrad wieder bis auf 86%.

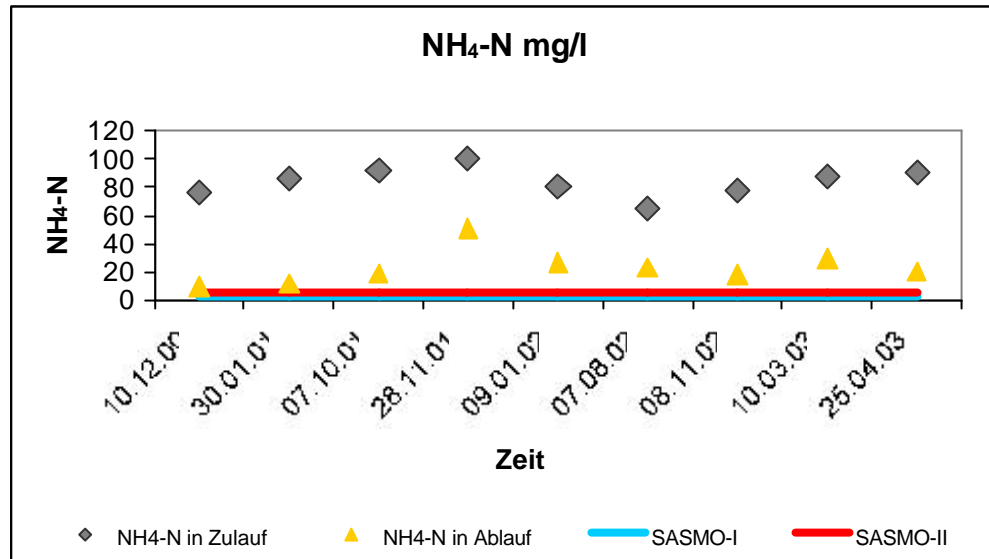


Abb. 20: Ammonium in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie

Alle Werte zeigen zu hohe Konzentrationen im Vergleich mit der *SASMO-Richtlinie*. Das lag an der hydraulischen Belastung der kleinen Fläche der Pflanzbeete. Die spezifische Fläche pro Einwohner wurde sehr niedrig gehalten, um der Gefahr einer Versalzung der Anlage vorzubeugen.

Im Bericht des Landwirtschaftsministeriums wurde abgeklärt, dass der relativ hohe Anteil an Ammonium in dem Ablauf nicht schädlich sei, Ammonium wurde als langsam verfügbarer Dünger bezeichnet und eine Auswaschung aus dem Boden für leicht möglich gehalten. So wurde das gereinigte Abwasser für Bewässerungszwecke in der Landwirtschaft freigegeben.

Es besteht aber in der Zukunft immer noch die Möglichkeit neue Pflanzbeete anzuschließen, um Ammonium weiter zu oxidieren.

6.1.5 Nitrit

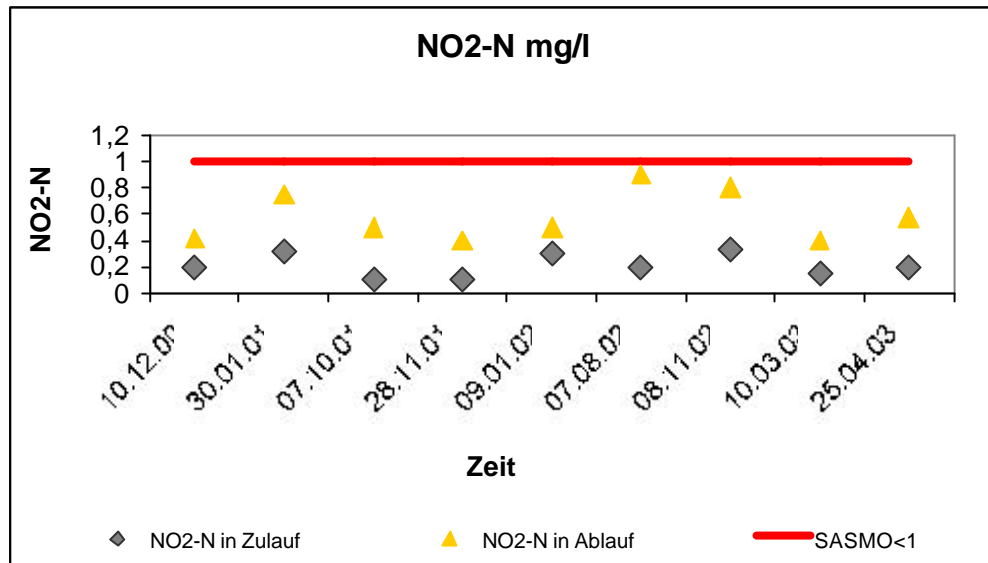


Abb. 21: Nitrit in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie

Im Pflanzenbeet oxidiert Ammonium über Nitrit zu Nitrat. Die Werte des Nitrits entsprechen in den Dreijahren der SASMO-Richtlinie.

6.1.6 Nitrat

Ein wichtiger Wert ist auch der Nitrat-Gehalt. Durch die vertikale Durchströmung werden unterschiedliche Milieubedingungen geschaffen. An der Oberfläche der Pflanzbeete und direkt an den Wurzeln erfolgt der aerobe Prozess der Nitrifikation, die Umwandlung von Ammonium in Nitrit und Nitrat, und in den tieferen Schichten des Pflanzenbeets der anaerobe Prozess der Denitrifikation, die Reduktion von Nitrit und Nitrat zu Stickstoff N_2 .

Der nicht sehr effektive Nitratabbau ist für vertikal beschickte Pflanzkläranlagen kennzeichnend. Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass Horizontalanlagen die Nitratkonzentration stärker senken, was auf eine bessere Denitrifikation zurückzuführen ist (Geller, G. und Höner, G., 2003, S. 19).

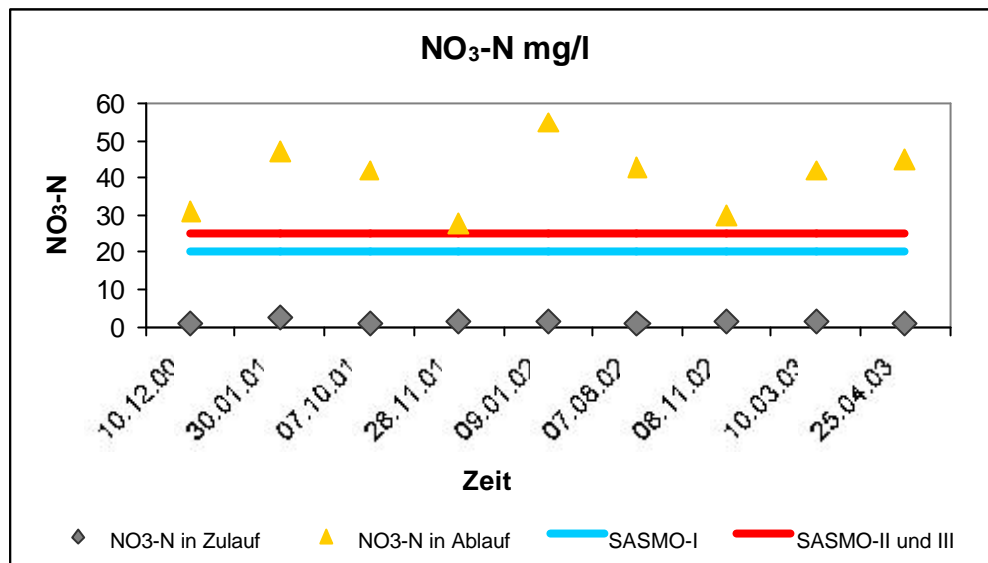


Abb. 22: Nitrat in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie

Die hohen Nitrat-Konzentrationen im Ablauf der Versuchsanlage zeigen, dass die Denitrifikation nur in geringem Umfang stattgefunden hatte.

Vermutlich könnte dies durch Hinzufügung eines horizontal beschickten Pflanzbeetes verbessert werden. Angesichts der Nutzung des gereinigten Abwassers für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen ist der hohe Nitratgehalt allerdings eher günstig, insbesondere wenn Kulturpflanzen angebaut werden, die einen hohen Stickstoffbedarf haben.

Allerdings sollten die Böden der Anbauflächen in bestimmtem Abstand analysiert werden, um die Konzentrationen des Nitrats und Phosphats in den Ackerböden unter Kontrolle halten zu können.

6.1.7 Phosphat

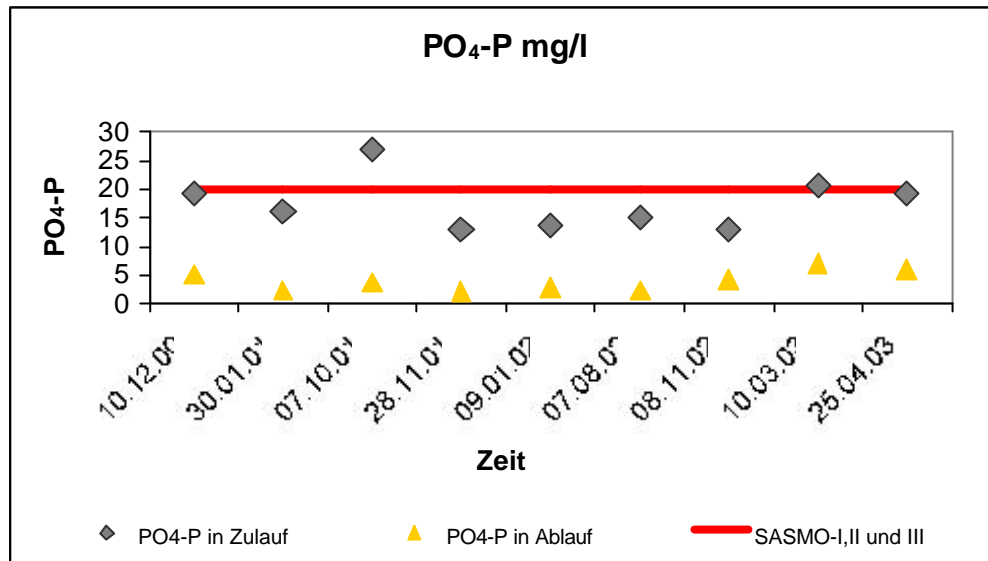


Abb. 23: Phosphat in Zu- und Ablauf und SASMO-Richtlinie

Die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Elimination erfolgte durch den hier verwendeten eisenhaltigen Sand (s. Tabelle 8) in dem Phosphat in Form von Ca-, Fe-, Mn-, und Al-Komplexen gebunden wird.

Diese Wirkung des Sandes wurde verstärkt durch die Beimischung von Eisenspänen. Ein Teil des Phosphats wurde vermutlich durch die Biomasse aufgenommen. Der Wirkungsgrad der P- Elimination erreichte einen Wert von 86%. Alle Ablaufwerte entsprechen den *SASMO-Richtlinie*.

6.1.8 Schwermetalle

Schwermetalle sind grundsätzlich nicht abbaubar, deswegen setzen sie sich entweder im Schlamm ab, werden im Boden zurückgehalten, von den Pflanzen aufgenommen oder durchfließen die Anlage unverändert. Das Abwasser in *HARAN AL-AWAMIED* ist häusliches Abwasser und daher nicht besonders mit Schwermetallen belastet. Die ermittelten Schwermetallkonzentrationen im Ablauf der Anlage erfüllen die Anforderungen der *SASMO-Richtlinie* für Trinkwasser (*SASMO, 1994*).

Tabelle 15: Metall- und Cyanid-Konzentrationen 11.08.2002

Parameter	Zulauf	Ablauf
c(Pb), Blei	0,025 mg/l	0,01 mg/l
c(Zn), Zink	0,9 mg/l	0,5 mg/l
c(Cu), Kupfer	1,1 mg/l	0,5 mg/l
c(Ni), Nickel	0,03 mg/l	0,02 mg/l
c(Cd), Cadmium	0,004 mg/l	0,002 mg/l
c(Cr _{ges}), Chrom	0,02 mg/l	0,01 mg/l
c(Fe), Eisen	0,1 mg/l	3 mg/l
c(CN), Cyanide	0,02 mg/l	0,01 mg/l

Die Probenentnahme erfolgte im Zu- und Ablauf der Anlage

6.1.9 Entfernung von Krankheitserregern

Keime und Krankheitserreger stellen eine hygienische Belastung des Abwassers dar. Eine wichtige Aufgabe von Pflanzenkläranlagen wie von Kläranlagen allgemein ist die Verminderung dieser Belastung. Nach den bisherigen Erfahrungen mit Pflanzenkläranlagen in Deutschland erreichen diese sehr guten Keimentfernungsraten (*Geller, G. und Höner, G. 2003, S. 26 und 27*).

Wegen der Verwendung des gereinigten Abwassers in der Landwirtschaft war für die Anlage von *HARAN AL-AWAMIED* die Elimination von Krankheitserregern besonders wichtig. Im allgemeinen sind im unbehandelten Abwasser etwa 100 - 1000 Wurmeier pro 100 ml und 11000 Fäkalkeime pro 100 ml enthalten (*Bewässerungsministerium, Verschmutzungsbekämpfung Abteilung: Bericht 2000, S. 15 - 17*).

Die Tabelle 16 zeigt die Verringerung der Keimbelastung. Die Untersuchungen fanden (mehrere Male) im „Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen“ statt. Dabei wurden - wie üblich - die pathogenen Keime nur im Ablauf der Kläranlagen untersucht.

Tabelle 16: Pathogene Keime des gereinigten Abwassers

Pathogene Keime	Konzentration
Fäkalkeime	1000 pro 100 ml
Wurmeier	1 pro 1 Liter

Die *HARAN AL-AWAMIED* Anlage überzeugt hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Keimverminderung. Deswegen ist eine Desinfektionsstufe nicht nötig. Die Anforderungen an die Reinigungsleistung, wie sie in der Richtli-

nie für gereinigtes Abwasser nach SASMO aufgestellt sind, werden erfüllt.

Bei der technischen Kläranlage in *DAMASKUS* wurden die Wurmeier lediglich bis auf 10 Wurmeier pro 100 ml reduziert. Um die Zahl der Wurmeier im Ablauf der Anlage auf die vorgeschriebenen Richtwerte zu reduzieren, wären zusätzliche Absetzbecken von 50 - 70 Hektar Größe und 4 Meter Tiefe mit Aufenthaltszeiten von 4 - 6 Tagen nötig. Da dies zu viel Platz und Geld kosten würde, sucht die Verwaltung derzeit eine andere anwendbare und bezahlbare Lösung (*Bewässerungsministerium, Abteilung der Verschmutzungsbekämpfung: Bericht 2000, S. 15*).

Wie unsere Untersuchungen zeigen, werden Krankheitserreger wie Fäkalkeime und Wurmeier in der Pflanzenkläranlage effizienter beseitigt. Die Werte entsprechen nicht nur der *SASMO-Richtlinie* für die Nutzung geklärten Abwassers in der Landwirtschaft, sondern genügen auch den zulässigen Höchstwerten der Trinkwasserrichtlinie (*SASMO Trinkwasserrichtlinie, Syrien, 1994*).

6.1.10 Bodenanalyse des bewässerten Ackerbodens

Nach den ersten drei Jahren wurden erstmals eine Bodenanalyse vom umliegenden Ackerland, das mit dem gereinigten Abwasser bewässert wurde, durchgeführt. Es ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 17: Bodenanalyse in *HARAN AL-AWAMIED*

Parameter	Bewässerter Boden mit gereinigtem Abwasser
PH-Wert	7,5
CaCO ₃	31,5 g/100g
Nitrat	0,09 g/100g
Organische Stoffe	3,34 g/100g
Phosphor	18,7 p.p.m.
Eisen	16,9 p.p.m.
Kupfer	2,6 p.p.m.
Körneranalyse	Anteil
Sand	24 %
Schluff	28 %
Lehm	48 %

(*Landwirtschaftsministerium - Management und Forschungsabteilung für Natur Ressourcen, 2003*)

Es wurde in dem Bericht erwähnt:

1. Der Boden braucht keinen zusätzlichen Dünger.
2. Der hohe Phosphatgehalt ist im Prinzip kein Problem, kann aber unter bestimmten Bedingungen durch Fixierung von Eisen, Zink und Kupfer zu Mangelercheinungen bei Pflanzen führen.
3. Als Feldfrüchte werden Baumwolle im Sommer und Gerste im Winter empfohlen. Auch alle hochwachsenden Gemüsesorten wie Bohnen oder Auberginen können angebaut werden.

(Bericht des Landwirtschaftsministeriums nach der Bodenuntersuchung des Ackerlands, 2003)

Insgesamt zeigten unsere Untersuchungen, dass die Pflanzbeete in der Versuchsanlage ausreichend groß angelegt wurden, so dass trotz schwankender hydraulischer sowie stofflicher Belastung die Schadstoffgrenzen der *SASMO-Richtlinie* weitgehend eingehalten werden konnten.



Abb. 24: Die Schilfbeete nach der Einweihung. Man erkennt den Anfangsbesatz mit Schilfpflanzen (eigenes Foto).



Abb.25: Ein Schilfbeet nach drei Jahren (eigenes Foto).



Abb.26: Das Schlammbehandlungsbeet nach drei Jahren (eigenes Foto).

6.2 Politische und ökonomische Betrachtungen über die Einrichtung von Pflanzenkläranlagen in Syrien

Um Pflanzenkläranlagen in Syrien einzusetzen und den als sehr sinnvoll erwiesenen Bau solcher Einrichtungen zu fördern, müssten eine Reihe von politischen, soziologischen und ökonomischen Voraussetzungen geschaffen werden.

6.2.1 Der politisch-soziologische Aspekt

Da zurzeit für die Thematik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“ und für die Genehmigung zum Bau von Pflanzenkläranlagen *sieben* verschiedene Ministerien zuständig sind, wäre es förderlich, um diese Verfahren effizienter zu gestalten, eine Konzentration der Kompetenzen anzustreben. Außerdem müsste geprüft werden, ob eine Dezentralisierung der Entscheidungskompetenzen in die verschiedenen Provinzen sinnvoll wäre. Dies könnte durch die Schaffung eines entsprechenden Ministeriums oder durch die Anbindung der Thematik an ein einzelnes Ministerium geschehen oder aber durch das Delegieren von Kompetenzen an die Gemeinden, die zurzeit nur wenig Einfluss und Entscheidungskompetenz haben.

Wenn die Gemeinden die Reinigung ihres eigenen Abwassers selbst verwalten könnten, würden sie mehr Eigenverantwortlichkeit entwickeln, was sicherlich zu einer Verbesserung der allgemeinen Wasserversorgung beitragen würde. So würde eine größere Verbreitung von dezentralen Pflanzenkläranlagen die zurzeit noch übliche Verwendung von Trinkwasser zur Bewässerung in der Landwirtschaft reduzieren. Das allgemeine Ziel sollte sein, das sehr knapp vorhandene Wasser von Trinkwasserqualität auch nur noch als Trinkwasser zu verwenden.

Ferner müssten leicht verständliche technische Regeln für den Betrieb von Pflanzenkläranlagen herausgegeben werden, damit die Betreiber der Anlagen ausreichend darüber informiert werden, wie die Anlage zu betreiben ist und in einem funktionsfähigen Zustand gehalten werden kann. Dazu wäre es auch sinnvoll, jährliche Erfahrungsberichte über

bereits bestehende Anlagen zu erstellen, um so neue Informationen und praktische Erfahrungen direkt weitergeben zu können. Für den Fall, dass in Zukunft weitere Pflanzenkläranlagen in Syrien gebaut werden, sollte für eine Kooperation und für Erfahrungsaustausch zwischen den Betreibern gesorgt werden.

Dringend notwendig ist es, für die Schulung des Personals Mittel und Schulungskräfte einzuplanen.

6.2.2 Der ökonomische Aspekt

Der Bedarf an landwirtschaftlicher Bewässerung und auch der Bedarf an Wasser für industrielle Zwecke könnte weitgehend durch gereinigtes Abwasser gedeckt werden. Die Gemeinden könnten das gereinigte Abwasser sogar verkaufen. Wie der Verkauf des Trinkwassers und der Gebrauch des Süßwassers in der Landwirtschaft und Industrie durch Wasseruhren geregelt und abgerechnet wird, so müssten auch für den Gebrauch des gereinigten Abwassers Abrechnungssysteme entwickelt werden.

In Syrien stellen die Kosten bei der Auswahl des Abwasserreinigungssystems einen wichtigen Faktor dar. Das gilt insbesondere für ländliche Gebiete. Die folgende Tabelle gibt die angenommenen Herstellungskosten und Betriebskosten unterschiedlicher Systeme der Abwasserreinigung in Syrien durch eine Studie der *General Establishment for Technical Studying and Consultancies* wieder. Entsprechende Anlagen wurden aber in Syrien noch nicht errichtet. Daher liegen auch keine Werte über die Reinigungsleistung solcher Systeme vor.

Die folgende Tabelle zeigt die theoretisch ermittelten Herstellungs- und Betriebskosten einer Kläranlage mit 50 m³ per Tag und etwa 625 Einwohnern:

Tabelle 18: Kosten einer Kläranlage mit 50 m³/d und etwa 625 Einwohnern

Anlagentyp	Herstellungskosten Pro EW	Betriebskosten Pro EW/a	spezifische Fläche m²/EW
a) Unbelüftete Gräben (<i>Stabilization ponds</i>)	10.938 SP/EW 182,28 ?/EW	960 SP/EW.a 16 ?/EW.a	8,96 m ² /EW
b) Oxidation Gräben (<i>Aerated Lagoons</i>)	8.704 SP/EW 145,05 ?/EW	1.152 SP/EW.a 19,2 ?/EW.a	2,88 m ² /EW
c) Anaerobe Vorklä- rung (<i>Anaerobe pre Treat- ment</i>)	6.786 SP/EW 113,09 ?/EW	448 SP/EW.a 7,4 ?/EW.a	1,3 m ² /EW
d) Anaerobe Vorklä- rung mit Nachklä- rungsstufe (<i>Anaerobe Treatment</i>)	7.966 SP/EW 132,76 ?/EW	640 SP/EW.a 10,6 ?/EW.a	1,6 m ² /EW

(General Establishment for Technical Studying and Consultancies in cooperation with Ministry for housing and utilities 2002)

Die Herstellungskosten enthalten keinen Laborbau und die Betriebskosten kein Verbrauchsmaterial. Für die Berechnungen wurde ein Wasserverbrauch pro Person von etwa 80 - 100 l/Tag zu Grunde gelegt, viel höher als in der Realität (s. Kapitel 4.2).

Zu a) Die Herstellungskosten betragen 6.835.785 SP und die Gesamtfläche beläuft sich auf 5.600 m². Sie enthalten die Kosten für Siebe, Pumpstation, Gestaltung der Gräben, Desinfektionsstufe, Sammel-tank, Schlammbehandlungsstufe, Betriebsgebäude und Zaun und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten.

Zu b) Die Herstellungskosten betragen 5.439.585 SP und die Gesamtfläche beläuft sich auf 1.800 m². Sie enthalten die Kosten für Siebe, Pumpstation, Gestaltung der Becken, Nachklärungsabsetzbecken, Desinfektionsstufe, Sammel-tank, Schlammbehandlungsstufe, Pumpstation, Betriebsgebäude und Zaun und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten.

Zu c) Die Herstellungskosten betragen 4.240.900 SP und die benötigte Fläche ist 838 m² groß. Sie enthalten die Kosten für anaerobe Becken, Pumpstation, Sammel-tank, Wächter- und Wachzimmer und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten, aber keine Schlamm-

behandlung. Das Abwasser ist für Bewässerungszwecke nicht geeignet.

Zu d) Die Herstellungskosten in Höhe von 4.978.550 SP auf einer benötigten Fläche von etwa 1.000 m² sowie Kosten für anaerobe Becken, Pumpstation, Nachklärungsabsetzbecken, Sammeltank, Wächterzimmer und Aufenthaltsraum sowie die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten. In den Kosten ist keine Schlammbehandlung enthalten. Das Abwasser ist nicht geeignet für die Bewässerung von Gemüse und Obstbäumen.

In der folgenden Tabelle sind die Herstellungskosten und die Betriebskosten einer Kläranlage mit 500 m³ per Tag und etwa 6250 Einwohnern zusammen gestellt:

Tabelle 19: Kosten einer Kläranlage mit 500 m³/d und etwa 6250 Einwohnern

Anlage Typ	Herstellungskosten Pro EW	Betriebskosten Pro EW/a	spezifische Fläche m²/EW
a) Unbelüftete Gräben (<i>Stabilization ponds</i>)	1.785 SP/EW 29,74 ?/EW	192 SP/EW.a 3,5 ?/EW.a	1,6 m ² /EW
b) Oxidation Gräben (<i>Aerated Lagoons</i>)	1.137 SP/EW 18,93 ?/EW	346 SP/EW.a 5,7 ?/EW.a	1 m ² /EW
c) Belebungschlamm (<i>Conventional activated sludge</i>)	1.501 SP/EW 25,01 ?/EW	230 SP/EW.a 3,84 ?/EW.a	1 m ² /EW
d) Mehrstufige Belebungsbehandlung (<i>Extended aeration</i>)	1.522 SP/EW 25,35 ?/EW	288 SP/EW.a 4,8 ?/EW.a	1 m ² /EW

(*General Establishment for Technical Studying and Consultancies in cooperation with Ministry for housing and utilities 2002*)

Zu a) Die Herstellungskosten betragen 11.155.100 SP auf einer benötigten Fläche von etwa 10.000 m² und enthalten die Kosten für Siebe, Pumpstation, Gestaltung der belüfteten und unbelüfteten Abwasserteiche, Desinfektionsstufe, Abwassersammeltank, Schlammbehandlungsstufe, Betriebsgebäude und Zaun und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten.

Zu b) Die Herstellungskosten betragen 7.101.050 SP auf einer benötigten Fläche von etwa 6800 m² und enthalten die Kosten für Siebe, Pumpstation, Gestaltung der belüfteten Becken, Gestaltung der Absetzbecken, Nachklärungsabsetzbecken, Desinfektionsstufe, Abwassersammeltank, Pumpstation, Betriebsgebäude und Zaun und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten.

Zu c) Die Herstellungskosten betragen 9.380.810 SP die Gesamtfläche beläuft sich auf 6800 m². Sie enthalten die Kosten für Siebe, Pumpstation, Gestaltung der Absetzvorklärungsbecken, Gestaltung der belüfteten Becken, Gestaltung der Absetzbecken, Nachklärungsabsetzbecken, Schlammverdichtungsbecken, Schlamm Trocknungsbecken, Desinfektionsstufe, Abwassersammeltank, Pumpstationen für Abwasser und Schlamm, Betriebsgebäude und Zaun und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten.

Zu d) Die Herstellungskosten betragen 9.508.010 SP auf einer benötigten Fläche von etwa 6800 m² und enthalten die Kosten für Siebe, Pumpstation, Gestaltung der belüfteten Becken, Gestaltung der Absetzbecken, Nachklärungsabsetzbecken, Schlammverdichtungsbecken, Schlamm Trocknungsbecken, Desinfektionsstufe, Abwassersammeltank, Pumpstationen für Abwasser und Schlamm, Betriebsgebäude und Zaun und die Betriebskosten für Personal und Wartungsarbeiten.

Diese Berechnungen, die allerdings nicht praktisch erprobt wurden, also nur theoretische Werte darstellen, deuten darauf hin, dass eine höhere Konzentration, also das Zusammenfassen der Abwässer von größeren Einwohnerzahlen, zu kostengünstigeren Bedingungen führt.

Im übrigen gilt bei dem Vergleich dieser Berechnungen mit den Ergebnissen unserer Anlage in *HARAN AL-AWAMIED*, dass diese wesentlich kostengünstiger errichtet und betrieben werden kann.

Die Gesamtkosten für die Herstellung der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* beliefen sich auf 6.005.807 Syrische Pfund, damit betragen die Herstellungskosten pro Einwohner etwa 858 Syrische Pfund oder 13,7 Euro/EW. Die Betriebskosten liegen bei 55 SP/(EW a), etwa 1 Euro/EW.a. Im Vergleich mit den entsprechenden Werten der oben ange-

gegebenen Studien sind sowohl die Herstellungs- als auch die Betriebskosten der Pflanzenkläranlage wesentlich geringer.

Die Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* wurde auf etwa 6000 m² Fläche gebaut, damit beträgt die spezifische Fläche der Pflanzkläranlage pro Einwohner etwa 0,85 m²/EW. Im Vergleich mit den entsprechenden Werten in Tabellen 18 und 19 ist die spezifische Fläche der Pflanzenkläranlage geringer.

Wie die folgende Tabelle zeigt, sind die Herstellungs- und Betriebskosten einer vorhandenen Kläranlage in SALAMIEH, die als unbelüftete Gräben gebaut und für eine Leistung mit 8000 m³/Tag auf eine Fläche von etwa 150.000 m³ ausgelegt wurde, folgende:

Tabelle 20: Herstellungs- und Betriebskosten der Kläranlage in SALAMIEH

Anlage Typ	Herstellungskosten Pro EW	Betriebskosten Pro EW/a	spezifische Fläche m²/EW
Unbelüftete Gräben (<i>Stabilization ponds</i>)	429 SP/EW 7,15 ?/EW	25 SP/EW.a 0,41 ?/EW.a	2,1m ² /EW

Die Herstellungskosten und die Betriebskosten für SALAMIEH Anlage sind geringer als die Anlagen in *HARAN AL-AWAMIED* (Herstellungskosten: 858 SP/EW und die Betriebskosten: 55 SP/EW.a), aber die Untersuchungen in der SALAMIEH Anlage zeigen eine geringere Reinigungsleistung. So wird z.B. BSB₅ von 240 mg/l nur bis auf 80 mg/l und CSB von 500 mg/l bis nur auf 182 mg/l reduziert. (*SALAMIEH-Anlage, 2003*)

Aber das größte Problem in der Anlage ist die unzureichende Reduzierung der Wurmeieranzahl (mehr als 10 Wurmeier pro 100 ml), was an der geringen Aufenthaltszeit des Wassers in den Gräben und die dadurch gegebene Schwierigkeit, die Wurmeier abzusetzen, liegt. Zusätzlich findet eine erhebliche Geruchsbelästigung statt.

6.3 Baumaterial und Betrieb der Pflanzenkläranlage in HARAN AL-AWAMIED

6.3.1 Baumaterial

Ein Teil der Abdichtungsfolie für die Anlage der Pflanzbeete wurde aus Deutschland importiert, ein anderer Teil wurde aus den lokalen syrischen Produktionen gekauft. In der Qualität und Haltbarkeit gab es zwischen beiden Produkten keinen erkennbaren Unterschied. Da die Folie aus Deutschland viel teurer war als die einheimische, ist für zukünftiges Bauen zu empfehlen, nur die einheimische Folie zu verwenden. Das würde nicht nur die Herstellungskosten verringern, sondern auch die lokale Wirtschaft stärken.

Zur Füllung der Pflanzbeete wurde ein eisenhaltiger Sand verwendet, der zusätzlich mit Eisenspänen angereichert wurde. Letzteres ist nach unseren Erfahrungen aber nicht nötig, es sei denn, das gereinigte Abwasser soll in Flüsse oder ins Meer geleitet werden. Dann muss das Wasser nämlich annähernd phosphatfrei sein, was durch den Zusatz von Eisenspänen gewährleistet wird. Der Sand sollte vor seinem Einsatz auf seine Konsistenz untersucht werden, um die notwendige Durchlässigkeit zu gewährleisten. Die Körnunggröße sollte den Normen der ATV entsprechen.

Die Verteilungsdrainage sollte in Ländern mit heißen Klimaten nicht - wie in Deutschland bisweilen vorzufinden – oberhalb der Kiesschicht, sondern *innerhalb* der Kiesschicht angelegt werden, damit während der heißen Jahreszeit Verdunstung und Geruchsbelästigung vermieden werden. Aufgrund dieser Vorsichtsmaßnahme fand bei der Anlage in HARAN AL-AWAMIED, die sehr nah an Wohngebieten liegt, eine Geruchsbelästigung bisher nicht statt.

6.3.2 Anlage und Größe der Beete

Die Erfahrungen mit den relativ großen Pflanzbeeten unserer Anlage haben gezeigt, dass es günstiger wäre, mehrere kleinere Beete hintereinander anzulegen. Wichtigster Grund hierfür ist, dass die ausgelegte Folie und die Kies-Sand-Kies-Schichten nicht mit Maschinen befahren werden dürfen, damit sich der Dichtigkeitsgrad nicht verändert oder das

Gefüge zerstört wird. Da die Bearbeitung bei großen Beeten nur von Hand geschehen kann, ist ein großer Arbeitseinsatz notwendig. Kleinere, hintereinander geschaltete Beete können bei gleicher Reinigungsleistung viel besser mit großen Maschinen bearbeitet werden, weil dann z.B. ein Bagger von allen vier Seiten um das Beet herumfahren kann. Ferner ist es bei großen Beeten schwieriger und arbeitsintensiver, das notwendige Gefälle einzumessen und zu schaffen. Aus Kostengründen sollte man möglichst ein eventuell am Bauort vorhandenes natürliches Gefälle nutzen.

Der Vorteil von kleinen Beeten ist außerdem, dass man bei auftauchenden Problemen einfach auf ein anderes Beet ausweichen kann, indem man das Abwasser dorthin leitet. Auch für anfallende Wartungsarbeiten ist es sinnvoller, mehrere kleine Beete zu haben. Durch die Ausweichmöglichkeiten bleibt insgesamt die Betriebssicherheit besser gewährleistet.

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, für die Anlage von Pflanzbeeten ein ausreichend großes Gelände vorzusehen, damit die Anlage bei Bedarf erweitert werden kann, indem neue Beete hinzugefügt werden.

6.3.3 Bepflanzung der Beete

Bei der Bepflanzung der Beete ist es von Nutzen, die Schilf-Rhizome nach der Entnahme vom natürlichen Standort in Wasser zu transportieren und in die vorbereiteten und angefeuchteten Beete zu setzen. Man kann aber auch die Rhizome zunächst in kleine Plastiktüten pflanzen und so weit heranwachsen lassen, bis die ersten drei Sprosse entstanden sind.

Dieser Vorschlag resultiert aus unseren Erfahrungen, denn wir hatten bei einem ersten Versuch die Schilf-Rhizome direkt in die Beete gesetzt, wo sie zum großen Teil bei länger anhaltender Trockenheit vertrockneten und bei anschließender Bewässerung verfaulten. Die Setzlinge aus der Zwischenwuchsphase sind jedoch alle angewachsen und haben in kurzer Zeit mehr als zwei Meter Höhe erreicht.

6.3.4 Vorreinigungsstufe und Funktionsdauer der Anlage

Bei der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* war festzustellen, dass die Vorreinigung des Abwassers in Absetzbecken ein sehr wichtiger Bestandteil des Gesamtkonzepts ist. Nur so können Partikel und Schlammteilchen aufgefangen werden und die Poren der Verteilungsdrainage frei und die Sandschicht durchlässig gehalten werden. Die Verwendung einer Vorreinigungsstufe hat auf die Funktionszeit großen Einfluss. Einfach ausgedrückt: Je besser die Vorklärung, um so länger der Nutzungszeitraum. Selbstverständlich wird ein sachgerechter Betrieb sowie eine regelmäßige und fachkundige Wartung vorausgesetzt. Hinsichtlich der Lebensdauer von Pflanzenkläranlagen zeigen Erfahrungen in Deutschland, dass eine solche Einrichtung durchaus 20 Jahre oder länger funktionieren kann. Danach muss der Filtersand zumindest teilweise ausgetauscht werden.

6.3.5 Klärschlamm Entsorgung

Unser ursprüngliches Vorhaben, den Klärschlamm zu den öffentlichen Klärwerken zu transportieren, ließ sich aus organisatorischen Gründen nicht verwirklichen. Deswegen wurde am Ort ein Klärschlammbeet gebaut, in dem der Klärschlamm behandelt wird. Aus der anfallenden Schlammmenge wurde ermittelt, dass das Beet fünf Jahre in Betrieb sein kann. Danach muss ein neues Beet angelegt werden. Der stabilisierte Schlamm kann in der Landwirtschaft genutzt werden

6.3.6 Laboruntersuchungen

Da es sich bei der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* um ein Pilotprojekt handelte, wurde auch ein eigenes Labor gebaut und vollständig eingerichtet, um die vorzunehmende Probenentnahme direkt vor Ort durchführen zu können. In Zukunft könnte ein solches Labor mehrere Pflanzenkläranlagen gleichzeitig betreuen, was wiederum die Baukosten für weitere Anlagen reduziert.

6.3.7 Gestaltung der Außenanlagen in *HARAN AL-AWAMIED*

Die Anlage wurde mit einem Zaun eingefasst, und es wurden dort Bäume und Blumen gepflanzt. Die Anlage macht so auch von außen einen ästhetisch guten Eindruck. Dadurch konnte die Akzeptanz bei den anwohnenden Bauern noch vergrößert werden.

Fazit: Insgesamt könnten Pflanzenkläranlagen wegen ihrer technischen Einfachheit und ihres wartungsarmen Betriebes für die ländlichen Gebiete Syriens die optimale Lösung der Abwasserreinigungsproblematik sein. Da dieses System mit der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* zum ersten Mal in Syrien eingesetzt wurde, fehlen noch viele Erfahrungen, so z.B. hinsichtlich der Beschickungsmenge oder der hydraulischen Belastung.

Auch für die Größe der spezifischen Beetflächen pro Einwohner oder pro 1m³ Abwasser gibt es noch keine Erfahrungswerte. Nun liegen erste Erfahrungen vor, doch müssen zur weiteren Optimierung der Beschickungsmenge, der Beetfläche und der Flächenaufteilung weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

6.4 Erfahrungen hinsichtlich des Personals

In *HARAN AL-AWAMIED* wurde die Verantwortung für den Betrieb und die Wartungsarbeiten von Anfang an auf die späteren Benutzer übertragen, also auf die Bauern, denen die anliegenden Felder gehören, die mit dem gereinigten Abwasser bewässert werden sollen. Das war eine sehr wichtige und sehr richtige Entscheidung, die sehr zum Funktionieren der Anlage beigetragen hat.

Das Wartungspersonal hatte ein wirkliches Eigeninteresse, die Anlage in einem guten und funktionierenden Zustand zu halten. Voraussetzung für die Herstellung des Interesses war eine richtige Informationspolitik: Alle Wartungspersonen wurden über den Sinn und Zweck und die Abläufe einer Pflanzenkläranlage unterrichtet und vor allem über die unmittelbaren Vorteile für sie selbst aufgeklärt.

Nach den Erfahrungen mit den Bewohnern in *HARAN AL-AWAMIED*, ist es wichtig, die Bewohner im Umkreis zukünftiger Pflanzenkläranla-

gen über Sinn und Zweck und die außerordentlichen Vorteile solcher Anlagen gut zu informieren.

6.5 Erfahrungen hinsichtlich der Akzeptanz durch die Gemeinde und die zuständigen Abwasserbehörden

Die Akzeptanz der Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* ist nach inzwischen drei Betriebsjahren sowohl bei den Bewohnern als auch bei der Gemeinde sehr groß. Es wurden fünf neue Arbeitsplätze geschaffen. Die Gemeinde ist durch den Bau dieser Pflanzenkläranlage besser vor den in Syrien sehr verbreiteten Wurmkrankheiten geschützt, die durch das Aufbringen ungereinigter Abwässer auf die Felder und den Verzehr des davon geernteten kontaminierten Gemüses übertragen werden.

Bei der allgemeinen Wasserknappheit in Syrien, insbesondere in diesem wüstennahen Gebiet und bei der bestehenden Abhängigkeit von Wasserzuteilungsraten ist durch die Pflanzenkläranlage die Aussicht auf stets und in der Nähe verfügbares Wasser zur Bewässerung der Felder sehr erfreulich.

Auch die zuständigen Abwasserbehörden in *DAMASKUS* sind von dem Projekt angetan und haben eine Studie in Auftrag gegeben, durch welche die Ergebnisse unserer Erfahrungen mit der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* schon ausgewertet werden. Als Folge davon möchte die zuständige Abwasserbehörde im „Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen“ in Zusammenarbeit mit der KfW im Großraum *DAMASKUS (RIF DIMASHQ-PROVINZ)* zwanzig weitere Pflanzenkläranlagen bauen.

Um die Akzeptanz einer Pflanzenkläranlage zu erhöhen, ist auch die richtige Öffentlichkeitsarbeit entscheidend. So wurde die örtliche Presse umfassend über die Pflanzenkläranlage informiert, was dazu führte, dass es mehrere Berichte sowohl im syrischen Fernsehen als auch in unserer Regionalzeitung gab (s. *Anhang 9.1*). Dies diente nicht nur der Information der Bevölkerung. In vielen Fällen wurde auch die Schwellenangst vor der neuartigen Anlage genommen.

Mittlerweile haben sich viele Bauern von sich aus an uns mit der Bitte gewandt, ähnliche Anlagen bei ihnen zu errichten, wobei sie bereit sind, kostenlos Land zur Verfügung zu stellen.

Auch die große Anzahl der Besucher der Anlage zeigt das Interesse, das diese Anlage inzwischen geweckt hat. Besucher kamen unter anderem auch von Abwasserverwaltungen und es kamen Professoren der unterschiedlichen Universitäten Syriens. Auch deutsche Experten, die sich wegen Wasser- und Abwasserentsorgungsprojekten in Syrien aufhielten, haben die Anlage besichtigt. Zur allgemeinen Information führt eine Broschüre in Deutsch und Arabisch durch die Anlage (s. *Anhang 9.2*).

Um Besuchern den Aufbau und das Wirkprinzip der Pflanzbeete erklären zu können, wurde ein Plexiglasmodell (50 cm 50 cm 70 cm) gebaut.

6.6 Besonderer Nutzen von Pflanzenkläranlagen für Syrien

Die besondere Siedlungsstruktur Syriens mit wenigen großen Städten und vielen kleinen, verstreut liegenden Ortschaften erfordert eine speziell darauf abgestimmte Abwasserentsorgung. Sind in den großen Städten die konventionellen Kläranlagen sinnvoll, so sind diese bei der vorliegenden Zersiedelungsstruktur des Umlandes sowohl ökonomisch als auch ökologisch nicht zu empfehlen. Zudem wären die Kosten für die Errichtung und Wartung der ausgedehnten Zuführungskanalisation unbezahlbar.

Bei der Konzeption einer Abwasserentsorgung in Syrien sind auch die allgemeine Wasserknappheit und die Notwendigkeit der Bewässerung des größten Teils der landwirtschaftlich genutzten Flächen zu bedenken. Deswegen müssen *dezentrale* Anlagen gebaut werden, in denen das Abwasser vor Ort gereinigt und auch dort zur Bewässerung der Landwirtschaft wieder eingesetzt werden kann.

Syrien ist - was seine ländlichen Gebiete anbelangt - noch auf dem Stand eines Entwicklungslandes. Von daher ist der Bau konventioneller

Kläranlagen in ländlichen Gebieten bisher aus Kostengründen und aus Gründen des nicht vorhandenen technischen Know-hows vor Ort nicht zu realisieren. Demgegenüber können Pflanzenkläranlagen in dreierlei Hinsicht gerade den Bedürfnissen der ländlichen Gebiete gerecht werden

1. Es lässt sich mit solchen Anlagen eine dezentrale Entsorgung durchführen.
2. Das Abwasser steht nach der Klärung vor Ort zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Kulturen zur Verfügung.
3. Die Kosten sind so niedrig, dass sie ganz oder zum großen Teil von den Landgemeinden getragen werden könnten.

Die Frage, ob eine in Europa für das mitteleuropäische Klima entwickelte Pflanzenkläranlage auch für die besonderen klimatischen Bedingungen in semiariden Gebieten tauglich ist, konnte in allen Punkten positiv beantwortet werden. Während des dreijährigen Probetriebs wurde keinerlei Versalzung der Beete festgestellt. Die Effektivität der Anlage zeigte keine signifikanten jahreszeitlichen Schwankungen. Es ist jedoch wichtig, die Fläche kleiner zu wählen als in Mitteleuropa üblich, um den Wasserdurchfluss hoch zu halten, und damit die Versalzungsgefahr zu vermeiden. Eine gewisse, hierdurch bedingte Minderung der Reinigungsleistung kann in Kauf genommen werden, da das Wasser - anders als in Mitteleuropa - zur Bewässerung genutzt und nicht direkt in Gewässer eingeleitet wird.

Wegen der hohen Verdunstung und der möglichen Geruchsbelästigung sind geschlossene Wurzelraumanlagen den Teichkläranlagen mit ihrem offenen Wasserspiegel vorzuziehen. Die günstigste Lösung müsste jedoch für jeden Einzelfall geprüft werden.

Es sollte geprüft werden, ob Pflanzenkläranlagen für die Klärung von Industrieabwasser und auch wegen ihrer großen Fähigkeit der Krankheitserregerelimination als Nachklärung für konventionelle Abwasseranlagen eingesetzt werden können.

6.7 Zur Realisierung und Funktion von Pflanzenkläranlagen in entsprechenden Klimazonen¹¹

In der Diplomarbeit von JAHNKE (2003) an der Universität Hamburg wurde untersucht, welche Hemmnisse einer breiten Anwendung der Pflanzenkläranlagen in den Entwicklungsländern entgegen stehen. Es wurden 38 Experten, die Erfahrungen mit Pflanzenkläranlagen in der Entwicklungsländern hatten, befragt.

Vier Experten haben in Ägypten, Palästina und Syrien 6 bereits in Betrieb befindliche Pflanzenkläranlagen gebaut (JAHNKE, M., 2003, S. 41 und 42).

Über die Hemmnisse berichtet er:

„Die meisten Entwicklungsländer liegen in tropischen oder subtropischen Regionen. Durch das warme Klima ist ein konstant hoher biologischer Umsatz gegeben. Im Vergleich zu den gemäßigten Klimaten sind daher höhere Reinigungsleistungen zu erwarten. Trotzdem findet eine Verbreitung von CW in diesen Länder nur sehr langsam statt.“

„Bisher ist die Erforschung von Pflanzenkläranlagen hinsichtlich der biologischen, hydraulischen und chemischen Prozesse unter tropischen Bedingungen vernachlässigt worden.“

Heimische Pflanzenarten wurden in Entwicklungsländern bisher vollkommen ignoriert.

„In Entwicklungsländern ist es realistischerweise nicht zu verhindern, dass auch industriell verunreinigtes Wasser ins kommunale Kanalnetz eingeleitet wird“.

„Der Bau von CW exakt nach den Anleitungen aus dem 'Norden' kann zu inakzeptablen Reinigungsleistungen führen, wenn lokale Begebenheiten wie Temperatur, Regen und besonders die Zusammensetzung des Abwassers nicht beachtet werden“.

„Ein Mangel an **Umweltbewußtsein** bei den meisten Politikern und der Bevölkerung führe dazu, dass Wasser- und Abwassermanagement für weniger wichtig, als zum Beispiel Militärausgaben oder Straßenbau betrachtet wird.“ (Jahnke, M. 2003, S. 13 - 19).

¹¹ Vgl. Hierzu auch die Ausführungen im folgenden Kapitel.

Die Arbeit macht deutlich, dass Pflanzenkläranlagen in Entwicklungsländern nur unter Einbeziehung und Akzeptanz der lokalen Bevölkerung realisiert werden können.

Die Reinigungsleistung der in Entwicklungsländern untersuchten Anlagen (171 realisierte CW in 27 Ländern) ist abhängig vom gewählten Verfahrenstyp (Durchströmungsart, Pflanzenwahl und Bodenaufbau). Allgemein wird berichtet, dass Pflanzenkläranlagen verschiedener Arten in semiariden Gebieten gute Reinigungsleistungen aufweisen.

In Tunesien (*Bou Jerida* Gemeinde) wurde von der Firma **subterra** (*Krüger, J. Pflanzenkläranlagen GmbH*) eine Pflanzenkläranlage für 4 - 5 m³ Abwasser auf 80 m² Fläche als Vertikalfilter gebaut.

Die Anlage ist im Mai 2004 in Betrieb genommen wurden, wobei noch keine Werte über die Reinigungsleistung zu Verfügung stehen.

In Ägypten hat diese Firma auch eine Pflanzenkläranlage für 80 m³ Abwasser auf 750 m² Fläche als Vertikalfilter gebaut. Das Abwasser stammt von Nilkreuzfahrtschiffen und anderen touristischen Einrichtungen. Die Anlage wurde im Juni 2004 in Betrieb genommen. Die Firma berichtet, dass das Messprogramm zur Zeit läuft und bislang wurde CSB und BSB beprobt - CSB: 20 - 45 mg/l, BSB₅ 0 - 10 mg/l. Das gereinigte Abwasser wird für die Landwirtschaft genutzt.

7. Offene Fragen, zukünftige Forschungsaufgaben, Möglichkeiten der Übertragbarkeit

Durch die Beschäftigung mit der Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* über insgesamt etwa drei Jahre ergab sich eine große Anzahl von neuen Erfahrungswerten auf den unterschiedlichsten Gebieten des Baus und Betriebs.

Es blieben aber auch eine Reihe offener Fragen. Zum Teil entstanden sie erst während der Arbeiten an der Anlage.

Diese Fragen sollen hier aufgeführt werden, weil sie in einem größeren Rahmen - entweder durch eine zukünftige Erweiterung dieses Projekts oder durch den Bau weiterer Anlagen und durch die damit verbundene Durchführung neuer Forschungsvorhaben - geklärt werden könnten.

Dies bezieht sich sowohl auf den bautechnischen als auch auf den betriebstechnischen Rahmen, auf einige soziale, politische und umweltrelevante Fragen auf die langzeitige Funktion und auf den finanziellen Rahmen eines solchen Projekts.

7.1 Bautechnische Komponente

Was die offenen bautechnischen Fragen angeht, so hat sich im Laufe des Bauablaufs als wichtigste Neuerung bzw. Modifizierung herausgestellt, dass es einfacher und sinnvoller gewesen wäre, anstelle der zwei großen Beete mehrere kleine hintereinander geschaltete Beete zu bauen:

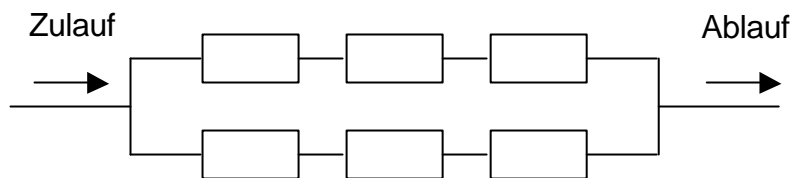


Abb. 27: Parallele und serielle Anordnung von Pflanzbeeten

Es müsste durch Versuche erforscht werden, ob mehrere kleinere Beete genau so gut funktionieren wie ein großes. (über die möglichen Vor- und Nachteile von großen bzw. kleinen Becken s. *Kapitel 6.3.2*).

Eine andere interessante Frage ist die nach dem Einsatz von unterschiedlichem Material zur Pflanzenbeetabdichtung. Es gibt folgende Alternativen: Beton, Ton und Folie. Für jede Anlage muss die passende Abdichtungsart gefunden werden, was auch vom Preis und von der Beschaffungsmöglichkeit abhängt.

Wenn z.B. am Ort gewachsener Ton vorhanden ist - wie in vielen Landesteilen Syriens -, dann ist es am sinnvollsten und preiswertesten, diesen vor Ort anstehenden Ton zu wählen, weil er das umweltverträglichste Material ist.

Eine dritte Frage ist die nach der Anwendung verschiedener Durchströmungsarten. In der Versuchsanlage in *HARAN AL-AWAMIED* wurde die vertikale Durchströmung der Pflanzbeete verwendet. Es wäre aber auch sehr interessant, die Verwendung einer horizontalen Durchströmung oder einer Kombination von beiden in Bezug auf die Verbesserung der Denitrifikation zu erproben.

Beim Bau einer Anlage muss schon bei der Planung berücksichtigt werden, wie das gereinigte Abwasser später verwendet werden soll.

Wenn es in Flüsse oder in das Meer eingeleitet werden soll, darf das Abwasser bestimmte Nitrat- und Phosphat- Rückstandswerte nicht überschreiten; wird es für die Bewässerung in der Landwirtschaft genutzt, sind dagegen gewisse Nitrat- und Phosphatrückstände sogar erwünscht.

In den vier technischen Kläranlagen in Syrien gibt es bis jetzt große Schwierigkeiten mit der Entfernung der pathogenen Keime und Wurmeier aus dem gereinigten Abwasser.

Forscher haben herausgefunden, dass die Beseitigung der pathogenen Keime und der Wurmeier in einem bepflanzten Bodenfilter effizienter ist als bei traditionellen Methoden der Abwasserbehandlung (*Geller, G. und Höner, G., 2003, S. 26 - 28*). Unsere Erfahrungen in *HARAN AL-AWAMIED* haben das bis jetzt bestätigt. Deswegen bietet es sich an,

Pflanzenkläranlagen als Nachreinigungsstufe von technischen Anlagen zu erproben.

Bei der großen und auch in Zukunft anhaltenden Wasserknappheit in Syrien ist die Wiederverwendung von Industrieabwasser ein weiteres wichtiges Thema.

Wenn es hier möglich wäre, die Reinigungskraft von Pflanzenkläranlagen zur Vor-, Haupt- oder Nachreinigung auch der Industrieabwässer einzusetzen, wäre dies ein gewaltiger Fortschritt. Auf diesem Gebiet bedarf es noch intensiver Forschungsarbeit. Auf alle Fälle müssten hier auch andere Pflanzenarten und andere Beetformen und Kombinationen erprobt werden, je nachdem, welche anfallenden Schadstoffe für das Wasser besonders belastend sind.

Ein weiterer Aspekt ist schließlich der Einfluss des Klimas auf den Betrieb von Pflanzenkläranlagen. Das heißt, es geht um den Einfluss verschiedener Klimate innerhalb Syriens auf die Reinigungsleistung einer solchen Pflanzenkläranlage.

An den Küsten haben wir feuchtwarme, in der Wüste trockenwarme, in den Bergen trockenkalte Klimazonen, die jede für sich unterschiedliche Auswirkungen auf derartige Anlagen haben können. Hier wäre ein Vergleich zwischen in verschiedenen Klimazonen gebauten Anlagen sehr interessant.

7.2 Betriebstechnische Komponente

Was die betriebstechnischen Erfahrungen angeht, so ist bei einer Pflanzenkläranlage die wichtigste Frage die nach der Reinigungskraft der eingesetzten Sumpfpflanzen.

Von daher wäre ein zukünftiger wichtiger Experimentierbereich das Ausprobieren verschiedener Sumpfpflanzenarten. Weiterhin muss geprüft werden, wie lange die Pflanzen in einem einmal angelegten Pflanzenbeet genutzt werden können.

Außerdem ist die Frage zu klären, ob und wie verschiedene Bewuchsarten einzusetzen sind. Vermutlich sind dabei mehrere kleinere Pflanz-

beete sinnvoll, damit man dann den Bewuchs in Stufen regulieren und erneuern kann. So könnte man auch in einer Anlage verschiedene Sorten von Sumpfpflanzen ausprobieren. Denkbar ist z.B., dass die Bepflanzung mit unterschiedlichen Sumpfpflanzen bei der Hintereinanderschaltung von Beeten besonders effektive Reinigungsleistungen zeitigt.

7.3 Soziale Komponente

Die alles entscheidende und wichtigste Frage für die Einrichtung von Pflanzenkläranlagen wird ihre soziale Akzeptanz sein. Gerade in arabischen Ländern ist alles, was mit Abwasser zu tun hat, bisher noch von starkem Tabu-Denken belegt.

Das Aufbringen von ungereinigtem Abwasser entspricht nicht den religiösen Vorschriften und wird nur der größten Not gehorchend akzeptiert.

Da könnte eine selbsttätig reinigende und Abwasser umwandelnde Pflanzenkläranlage eine gute Mittlerfunktion einnehmen. Es braucht aber sicherlich noch viel Zeit, bis sich die Einsicht durchsetzt, dass eine Pflanzenkläranlage nicht nur finanzielle Vorteile, sondern auch mehr Reinheit, mehr Gesundheit, mehr Ernte, mehr Unabhängigkeit und mehr Wohlstand bedeutet.

In der Diplomarbeit von Jahnke, M. (2003) „Pflanzenkläranlagen in Entwicklungsländern, Faktoren zur Verbreitung dieses Abwasserreinigungsverfahrens ermittelt durch eine Expertenbefragung“ wurde festgestellt, dass Pflanzenkläranlagen den Strukturen der Entwicklungsländer weitestgehend entgegenkommen. Dennoch kann es bei der Nichtbeachtung der komplexen sozioökonomischen Faktoren zu erheblichen Schwierigkeiten im Implementierungsprozess kommen. Um die Verbreitung von Pflanzenkläranlagen in Entwicklungsländern zu fördern, sollten die hier entwickelten Handlungsvorschläge in Kooperation mit allen beteiligten Akteuren umgesetzt werden (JAHNKE, M., 2003).

Die Firma **subterra** brauchte z. B. etwa 7 Jahre, um eine Pflanzenkläranlage in Ägypten zu errichten.

7.4 Politische und umweltpolitische Komponente

In einem Land wie Syrien, das eher zentralistisch aufgebaut ist, bedarf es eines langfristigen Entwicklungsprozesses, um sich an den Gedanken von dezentralen und selbständig verwalteten Kläranlagen zu gewöhnen.

Auch das von oben gesteuerte eher hierarchische Denken macht dies schwierig, und es bedarf Zeit, die Menschen zur Eigenverantwortlichkeit zu ermutigen und ihnen als einzelner Bürger, als Gruppe oder als Gemeinde eigene Kompetenzen und Verantwortlichkeiten zuzuweisen.

Umweltpolitische Erwägungen spielen bisher in Syrien eine untergeordnete Rolle. Dies liegt insbesondere an einem mangelnden Umweltbewusstsein. Um dies zu fördern, ist noch viel Aufbauarbeit notwendig. Wenn schon in reichen Industriestaaten Umweltprobleme so schwer zu lösen sind, ist es nicht verwunderlich, dass dies in einem kleinen, noch nicht sehr entwickelten Land noch viel schwieriger ist.

Hier gilt es, Zusammenhänge aufzudecken, die zeigen, dass Fragen der Existenzerhaltung oft mit Umweltfragen in enger Verbindung stehen.

7.5 Gesundheitlich-hygienische Komponente

Bevölkerungszuwachs und damit verbundene Wasserknappheit sind in Syrien zu einem zunehmend hygienischen Problem geworden. Durch die jahrelange notgedrungene Aufbringung von ungereinigten Abwässern auf die Ackerflächen sind weite Teile der syrischen Bevölkerung mit Würmern verseucht.

Auch bakteriell verursachte Durchfallerkrankungen haben ein erschreckendes Maß angenommen. Dies bedeutet nicht nur eine starke Einschränkung des menschlichen Grundrechtes auf gesunde Lebensumstände. Es führt über die Krankenbehandlung auch zu einer starken finanziellen Belastung der Staatskasse und es mindert die Arbeitskraft und damit das Bruttosozialprodukt des ganzen Landes.

Ein weiteres Forschungsprojekt könnte sich deshalb damit befassen, inwieweit durch die Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* eine Verbesserung der Gesundheitssituation in der Bevölkerung erreicht wurde.

7.6 Nachhaltigkeit

Was den Langzeitbetrieb angeht, so ist speziell in Syrien die größte Sorge die Frage der Versalzungsgefahr der Pflanzbeete.

Da das gereinigte Abwasser der Anlage in *HARAN AL-AWAMIED* zur Bewässerung der umliegenden Ackerbauflächen benutzt wird, wäre auch da nachzuprüfen, ob sich nach einer gewissen Benutzungsdauer ein Ansatz von Versalzung der damit bewässerten Ackerflächen ergibt.

Ferner muss weiterhin beobachtet werden, ob durch die Nutzung von gereinigtem Abwasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft eine Änderung in der Quantität und Qualität der Ernte zu verzeichnen ist und ob eventuell sogar eine Steigerung in der Anzahl der Ernten möglich ist.

Die zweite wichtige Langzeitfrage bezieht sich auf die Erforschung der Reinigungsleistung im Dauerbetrieb. Dabei geht es einmal um die Haltbarkeit der Bodenfilter im Pflanzenbeet und zum anderen darum, ob und wie lange die Durchlässigkeit der Filterfunktionen erhalten bleibt.

Damit verbunden ist die Frage, wie hoch und wie lange der Wirkungsgrad der Reinigungsleistung der Anlage erhalten bleibt und ob auf die Dauer die derzeit bestehende Elimination und die Abbauleistung von organischen und anorganischen Stoffen, von Schadstoffen und von pathogenen Keimen zu erhalten ist.

Ein Vergleich mit den vorhandenen Kläranlagen in den Nachbarländern Syriens in Bezug auf die Nachhaltigkeit des Betriebes ist derzeit noch nicht möglich, da die dortigen Anlagen erst seit ein paar Monaten in Betrieb sind.

7.7 Fazit

Die vorliegenden Resultate an der Pilot-Pflanzenkläranlage in *HARAN-AL-AWAMIED* haben eindeutig ergeben, dass eine dezentrale kleine Pflanzenkläranlage sich für ländliche Bereiche und Streusiedlungsbereiche in Syrien besser eignet als eine zentrale große, technische Kläranlage. Der einfache Bau, die leichte Bedienung und die geringen Kosten sind die entscheidenden Gründe.

Es fehlen allerdings noch Erfahrungen für einen langjährigen Dauerbetrieb (mehr als drei Jahre), und es müsste auch noch geprüft werden, inwieweit andere Klimazonen und andere Siedlungsstrukturen sich ebenfalls für den Einsatz von Pflanzenkläranlagen anbieten würden. Vor allem in den Ballungsräumen wäre dabei auch an eine Kombination mit technischen Kläranlagen zu denken.

Durch die Erfahrungen, die mit der Pflanzenkläranlage in *HARAN AL-AWAMIED* gemacht wurden, haben die Gemeinden der Nachbarschaft schon Interesse an solchen Kläranlagen gezeigt. Damit ist ein kleiner Anfang zur Verbesserung des Wasserproblems gemacht, aber die Lösung des gesamten Problems steht noch aus.

Es wäre wünschenswert, wenn in Syrien ein Forschungszentrum für die Verbreitung von Pflanzenkläranlagen eingerichtet werden würde, wo alle Daten gesammelt und ausgewertet werden und wo potentielle Anwender Rat und Beratung für den Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage finden können. Hier könnte auch das Personal ausgebildet werden, das die Anlagen später betreuen soll. Schließlich könnten die Daten und Erfahrungen dann auch anderen Ländern der Region zugänglich gemacht werden.

Ich hoffe, dass diese Technologie in Syrien und den anderen Nahostregionen in absehbarer Zeit breite Anwendung findet, um einen Beitrag zur Bewahrung unserer Umwelt zu leisten.

8.Literaturverzeichnis

Arab Organization for Agricultural Development (**AOAD**): Evaluation of the Effects of the Misuse of Non- conventional Water Resources in the Arab Agricultural Environment. League of Arab States, Khartoum September 2001.*

Arab Organization for Agricultural Development (**AOAD**): The Reuse of Sewage Water in Agriculture in the Arab Countries. League of Arab States, Khartoum November 2000.*

Arab Organization for Agricultural Development (**AOAD**): The use of Non- conventional Water Resources for irrigation in the Arab countries and their Effects. League of Arab States, Khartoum Juli 2001.*

ATV: Arbeitsblatt A 262: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen für kommunales Abwasser bei Ausbaugrößen bis 1000 Einwohnerwerte. - GFA, Hennef 1998.

ATV-Merkblatt M 709: Abwasser aus gentechnischen Produktionsanlagen und vergleichbaren Laboreinrichtungen. - GFA, Hennef 1996.

ATV-DVWK- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: Pflanzenkläranlagen ATV-DVWA- Infopaket 3, Hennef, Mai 2002.

ATV-DVWK- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft; Seminar: Nachhaltigkeit bei der Abwasserreinigung. Emmelshausen 30.10.2001.

Bahlo, K. und Wach, G.: Naturnahe Abwasserreinigung „Planung und Bau von Pflanzenkläranlagen“. Ökobuch, Freiburg 1992.

Bever, J. et al.: Weitergehende Abwasserreinigung. Oldenburg / München / Wien 1993².

Bewässerungsministerium Syrien, "Bericht; 2000 und 2001"^{***}

Bischoff, W.: Abwassertechnik. Teubner, Stuttgart 1993¹⁰

Bundesministerium für Forschung und Technologie (Hrsg.): Umweltforschung. Bonn 1994.

Clasmann, Anne-Beatrice: Erbitterte Kämpfe ums Wasser in der arabischen Welt
http://www.vistaverde.de/news/Politik/0306/04_wasser.htm

Cording, I.: Keimentfernung und Keimidentifizierung in der Abwas-

serreinigung – Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biokreisell, Tropfkörperanlage und Pflanzenkläranlage. Diplomarbeit der Universität Oldenburg 2000.

Deutsche wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (Hrsg.), DGMK- Projekt 453: Erfahrungsbericht über den Einsatz von Pflanzenkläranlagen zur Reinigung industrieller Abwässer. Hamburg, März 1992.

Engelmann, U.: Alternative Verfahren der kommunalen Abwasserbehandlung; Pilotprojekt Pflanzenkläranlagen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie(Hrsg.), Dresden 1999.

Fehr, G., Geller, G., Goetz, D. u.a.: Bewachsene Bodenfilter als Verfahren der Biotechnologie (Abschlussbericht). DBU, Hannover Februar 2002.

Geller, G. und Höner, G.: Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen. Springer, Berlin / Heidelberg / New York 2003.

Gunkel, G.: Renaturierung kleiner Fließgewässer, Bearb. von 16 Fachwissenschaftlern. Fischer, Jena / Stuttgart 1996.

Habeck-Tropfke, L. und Habeck-Tropfke, H.-H.: Abwasserbiologie. Werner, Düsseldorf 1992².

Hagendorf, U. u.a.: Bewachsene Bodenfilter als Verfahren der Biotechnologie; Umweltbundesamt (Hrsg.). Berlin Februar 2003.

Hartinger, L.: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Band VII. Ernst & Sohn, Berlin 1985³.

Herber, G.: Einfache Methoden für die Aufbereitung von Trinkwasser. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden 1984.

Imhoff's, K.: Handbook of Urban Drainage and Wastewater Disposal. John Wiley & Sons, Canada 1989.

Jahnke, M.: Pflanzenkläranlagen in Entwicklungsländern, Faktoren zur Verbreitung dieses Abwasserreinigungsverfahrens ermittelt durch Expertenbefragung; Diplomarbeit an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik, August 2003.

Klee, O.: Wasser untersuchen „Einfache Analysenmethoden und Beurteilungskriterien“. Quelle und Meyer, Heidelberg / Wiesbaden 1993².

Knoch, W.: Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Abfallentsorgung; Chemische und analytische Grundlagen. Cambridge, Weinheim / New York / Basel 1991.

- Koppe, P. und Stozek, A.: Kommunales Abwasser. Vulkan, Essen 1986.
- Kürschner- Pelkmann, F.: Wasser- Grundlagen, Zahlen Fakten. Brot für die Welt, Stuttgart Juli 2003.
- Kunz, P.: Behandlung von Abwasser. Vogel, Würzburg 1995⁴.
- Landwirtschaftsministerium, Syrien, 2000 **
- Landwirtschaftsministerium Syrien, "Bericht 2001".**
- Lorenz, S.: Abwasserfachtagung "Pflanzenkläranlagen als Element der Abwasserentsorgung im Ländlichen Raum"; Eckstädt, H. Institut für Kulturtechnik und Siedlungswasserwirtschaft; Universität Rostock (Hrsg.). Rostock 2002.
- Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen Syrien, "Vorschriften, 1999".**
- Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen Syrien, "Informationen 2000".**
- Mudrack, K. und Kunst, S.: Biologie der Abwasserreinigung. Spektrum Akademischer, Heidelberg / Berlin 2003⁵.
- Münch, C.: Die Bedeutung der wurzelassoziierten Mikroorganismen für die Stickstoffumsetzungen in Pflanzenkläranlagen; Technische Universität Dresden (Hrsg.). Dresden 2003.
- Qasim, Syed-R.: Wastewater Treatment Plants, Planning, Design and Operation. Lancaster, Pennsylvania (USA) 1994.
- Rump, H.-H. und Krist, H.: Laborhandbuch für die Untersuchung von Wasser, Abwasser und Boden. VCH, Weinheim/ New York 1987.
- Rustig, H., Platzer, C. und Toma, I.: Pflanzenkläranlagen im Einzugsgebiet stehender Oberflächengewässer, Verbundprojekt Bewachsene Bodenfilter. Biesenthal 2002.
- Rüffer, H. und Rosenwinkel, K.-H.: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Band VI. Ernst, Berlin 1986³.
- SALAMIEH-Anlage, Abwasseruntersuchungen, 2003.*
- Schmidt, E.: Ökosystem See „der Uferbereich des Sees“. Quelle und Meyer, Wiesbaden 1996⁵.
- Schulz, C. und Okun, D.: Surface Water Treatment for Communities in Developing Countries. John Wiley, Great Britain 1992.

Sekoulov, I. und Wilderer, P. (Hrsg.): Abwasserreinigung mit Hilfe von Wasserpflanzen. Eigenverlag, Hamburg 1982.

Simonis, U. E.: Wasser als Konfliktursache- Plädoyer für eine internationale Wasserstrategie, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin 2001. www.wz-berlin.de/uta

Spillmann, K.R.: Kriegsursache der kommenden Generationen? Der Kampf um das Wasser 2003.
www.dgap.org/IP/ip0012/spillman_p.html

Syrian Arab Organization for Standardization and Metrology: **(SAS-MO)** Richtlinie für Trinkwasserqualität S.N.S. 45, 1994.*

Syrian Arab Organization for Standardization and Metrology: **(SAS-MO)** Richtlinie für die Nutzung der gereinigter Abwasser für die Bewässerung S.N.S. 2752, 2003.*

Volkszählungsbüro Syrien, 2000 **

Welker, B. und Fehr, G.: Bewachsene Bodenfilter; Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit „ Abschlussbericht“; Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Hannover 2002.

Walter, H.: Vegetationszonen und Klima. Ulmer, Stuttgart 1979².

Wegelin, M.: Surface Water Treatment by Roughing Filters. SANDEC, Duebendorf 1996.

Wissing, F.: Wasserreinigung mit Pflanzen. Ulmer, Stuttgart 1995.

Wissing, F. und Hofmann, K.: Wasserreinigung mit Pflanzen. Ulmer, Stuttgart 2002².

*) In arabischer Sprache, weitere Informationen in Englisch unter der Webseite in Internet: www.aoad.org.

**) In arabischer Sprache.

Verwendete Internetseiten

<http://www.uno.de/umwelt/entwicklung/johannesburg/armut.htm>

http://www.lib.utexas.edu/maps/middle_east_and_asia/middleeast_ref01.jpg
(Stand 19. August 2004)

<http://www.worldbank.org>

http://www.fraunhofer.de/fhg/company/international/initiative/Wasser_Abwas ser_Abfall.jsp

<http://www.bmz.de/presse/reden/rede02062003.html>
<http://www.menschen-recht-wasser.de>
<http://www.hortikultur.ch/pub/files/78.pdf>
<http://www.gtz.de/laender/ebene3.asp?ProjectId=1405&Thema=224>
<http://www.wasser2003bildung.ch/deutsch/files/10Poster.pdf>
<http://www.re-natur.de/>
<http://www.menschen-recht-wasser.de>
<http://www.wz-berlin.de/uta>

Unterstützung

Abwassertechnik
Dipl. Ing. R. Polte
Schwertfegerstraße 1-3
2400 Lübeck
Tel.: 0451-89090208

Pflanzenkläranlagen GmbH (**subterra**)
J. Krüger
Schloss Duckwitz
17179 Duckwitz
Tel.: 039972-51961
e-mail: joachim.krueger@subterra.de

9. Anhang

Übersicht:

- 9.1 Erscheinungen in Zeitungen.
- 9.2 Kopie der verteilten Broschüre.
- 9.3 Fotos vom Bau der Anlage und der offiziellen Einweihung.
- 9.4 Effizienz der einzelnen Reinigungsstufen.
- 9.5 Effizienz der einzelnen Reinigungsstufen des Schlammes.
- 9.6 Provinzen Syriens.

9.1.3 In syrischer Regionalzeitung TESHREEN am 22.01.2002, No. 8217

محطة معالجة مياه مجاري بلدة حران العواميد تجربة ناجحة تعتمد النباتات المائية للتنقية

تعاني محافظة ريف دمشق من مشكلة التلوث الناجم عن الصرف الصحي للتجمعات السكانية الصغيرة التي يقل عدد سكانها عن ١٠٠٠ نسمة بكثرة في المحافظة. وقد قامت وزارة الإسكان، بالتعاون مع جامعة فلنسبورغ ومؤسسة التعاون التقني الألمانية، بدراسة محطة معالجة نموذجية تعتمد على استخدام نباتات مائية خاصة كعنصر مساعد في المعالجة البيولوجية، إضافة إلى المعالجة الفيزيائية المسبقة من الوحدات التالية أو المصافي وثانياً أحواض الترسيب وثالثاً أحواض حجز الرمال. وتعد معالجة مياه المجاري بالنباتات الطبيعية المائية من أبسط الطرق وأرخصها حيث يزيد استخدامها، بصفة مستمرة في جميع البلدان ولاسيما البلدان ذات السطوح الشمسية الجيدة، ودرجة الحرارة المعتدلة مثل بلادنا. وتتم المعالجة في هذه البحيرات بطريقة طبيعية تعتمد على نشاط مشترك متكامل تقوم به النباتات المائية، والبكتيريا، وبالإستعانة بأشعة الشمس، وبعض العناصر الموجودة في مياه المجاري. وقد اعتمد في معالجة مياه مجاري بلدة حران العواميد على طريقة استخدام حوض تعالج فيه مياه المجاري، بوساطة الفلتر (الترشيح) والنباتات المائية في آن واحد، حيث تتم المعالجة بوساطة هذا الحوض، الذي توجد فيه ثلاث طبقات من الرمل مختلفة الأقطار، وتزرع النباتات المائية على سطح هذا الحوض، حيث تكون مهمة الرمل تخليص المياه من المواد

العالقة في مياه المجاري، أما مهمة النباتات فهي امتصاص المواد المنحلة والذائبة في مياه المجاري بوساطة جذورها. وتتألف المحطة من المكونات التالية وهي:

- حوض تجميعي حيث يتم تجميع المياه على فترة ٢٤ ساعة، ومن ثم ضخها إلى المحطة.
- غرفة التوزيع، يتم توزيع مياه المجاري إلى الأحواض المخصصة للمرحلة الأولى والمرحلة الثانية للمحطة.
- حوض الترسيب يتم فيه ترسيب المياه، وحجز المواد الطافية والزيوت بوساطة حوض ترسيب دائري مخروطي.
- حوض المعالجة بالنباتات ويتألف من حوضين لكل مرحلة ويوجد فيه شبكات أنابيب، العلوية منها لتوزيع المياه على جميع أنحاء الحوض بوساطة الضخ، والشبكة السفلية ماصة، لتأخذ المياه من الحوض، وكلتا الشبكتين موجودتان ضمن رمل الحوض، ويتم زرع النباتات المائية على طبقة الرمل السطحية.
- حوض المراقبة مهمته تحديد منسوب المياه المطلوب في حوض المعالجة بالنباتات حيث يقوم برفع مستوى المياه أو تخفيضه حسب الطلب.
- وتستخدم المياه الخارجة من المحطة في سقاية الأراضي الزراعية المجاورة.
- ويتوقع تعميم هذه التجربة على بقية التجمعات السكانية الصغيرة المشابهة.

9.1.4 In der Wirtschaftsinformation No. 4 Wirtschaftsreferat der Deutschen Botschaft Damaskus May 2002

Small Aid Projects



Sludge treating for waste-water treating with reeds

Because of the increase of the population in the small villages in Syria missing waste-water treating became a central problem. Mrs. Abir Mohamed in cooperation with GTZ had the solution and started the pilot-waste-water-treatment-plant with reeds in the small village of Haran Alawid near Damascus.

To make the plant a full success, sludge treating was needed for the project. This was brought to the attention of the German Embassy and the necessary construction material was doned to the village to erect the sludge treating plant.




waste-water treating plant with reeds

sludge treating plant with reeds

9.2 Kopie der verteilten Broschüre

تحت رعاية السيد رئيس الجمهورية العربية السورية
الرفيق بشار الأسد
و بمناسبة الذكرى الثلاثين لقيام الحركة التصحيحية المباركة
يقوم المهندس حسان الصفدي وزير الإسكان والمرافق
وبحضور الرفيقين أمين المرع والمخافظ
في محافظة ريف دمشق
بتدشين محطة معالجة مياه الصرف الصحي لبلدة
حران العواميد
الأحد ١١/١٩/٢٠٠٠م



**Reinigung von Abwasser
mit
„befanzten Bodenfiltern“**

Der Verbrauch von Wasser ist in den letzten Jahren ständig gestiegen, das heißt die Abwassermenge ist auch gestiegen.
Bis heute sind die Verfahren zur Reinigung von Abwasser in vielen Ländern arbeitsaufwendig und teuer.
Das gestiegene Umweltbewusstsein und die Sorge um eine ständige Verminderung der Kosten lässt aus diesem Grunde das Interesse an kleinen Pflanzenkläranlagen immer größer werden.

Bemessungsgrundlage:
Die Pflanzenkläranlage in *Haran Alawamied* wurde für etwa 300 m³/Tag (für 7000 Einwohner) gebaut.

Bauteile: Abwassersammel-tank, Sandfang, Schwimm-Ölfang Tank, Absetzbecken, Pflanzenbeet, Revisions-schicht und Wassersammel-tank.

Vorteile der Pflanzenkläranlage:
Pflanzenkläranlage bewährt technisch einfach, sehr leistungsfähig, stabil, zuverlässige Reinigungsleistung, sehr geringer Strombedarf, günstig, ein naturnahes Verfahren und weltweit vielfach erprobt.

Diese Anlage wurde von GTZ und dem Ministerium für Wohnungsbau und Versorgung finanziert.
Betreuung: Flensburg- Damaskus Universität.

معطيات المشروع

- ١- عدد السكان في البلدة: ٧٠٠٠ نسمة.
- ٢- كمية المياه الواردة: ٣٠٠ م^٣/يوم
- ٣- أقسام المحطة: حran لجميع قناة تجميع الرمال مصافي حran لجميع المواد الطافية والزيوت حوض الترسيب حوض المعالجة والفلتر (حوض النباتات) حran تحكم حran تجميع المياه للمعالجة مقبض عمير كامل بناء إدارة
- ٤- الكلفة الإجمالية: ٥٥٠.٠٠٠.٠٠٠ ليرة سورية - تشمل بناء الإدارة والسور والمخفات.

تعتبر هذه المحطة اقتصادية حيث يمكن استخدام المياه المعالجة للرياسة وتربية الأسماك.

محطة معالجة مياه الصرف الصحي في بلدة حran العواميد

يهدف المشروع إلى معالجة مشكلة التلوث البيئي الناتجة عن مياه الصرف الصحي في بلدة حran العواميد.
إن الأهمية التي توليها وزارة الإسكان والمرافق لهذا المشروع تعود للأسباب التالية:

- ١- هو نتيجة بحث علمي شاركت فيه وزارة الإسكان والمرافق وجامعة فلسبورغ الألمانية وجامعة دمشق.
- ٢- تم تمويل المشروع بالشراكة بين وزارة الإسكان والمرافق وجمعية التعاون فتحي الألمانية GTZ، حيث مولت وزارة الإسكان الأعمال المدنية والإنشائية. والـ GTZ التجهيزات الميكانيكية والمحورية.
- ٣- إن نجاح هذا المشروع، سيقود إلى تعميمه على التجمعات السكنية المشابهة، فاله من ميزات اقتصادية وسهولة في الإدارة والصيانة.

تقدم بالشكر لكل من ساهم في نجاح هذا المشروع ونفص السيد وزير الإسكان والمرافق الذي كان لرعايته للمشروع الدور الرئيسي في نجاحه.

فريق العمل

9.3 Fotos vom Bau der Anlage und der offiziellen Einweihung



Auslegung der Abdichtungsfolie (eigenes Foto)



Die offizielle Einweihung, anwesend der Minister für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen, der Oberbürgermeister der Provinz Damaskus Land, und Vertreter aller zuständigen Abwasserbehörden (eigenes Foto).

9.4 Effizienz der einzelnen Reinigungsstufen



Effizienz der einzelnen Reinigungsstufen von Recht nach links (eigens Fotos)

1. Zulauf der Anlage
2. Zulauf des Pflanzenbeets
3. Ablauf des Pflanzenbeets

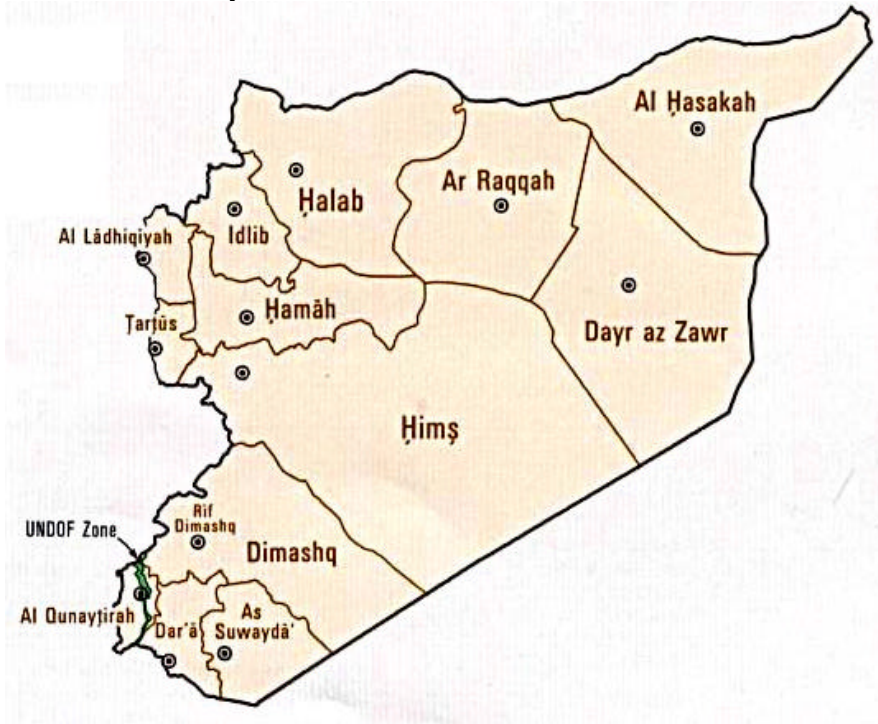
9.5 Effizienz der einzelnen Reinigungsstufen des Schlammes



Effizienz der einzelnen Reinigungsstufen des Schlammes von Recht nach links (eigens Fotos)

1. Zulauf zum Schlammbehandlungsbecken
2. Sickerwasser

9.6 Provinzen Syriens



Quelle:

http://www.lib.utexas.edu/maps/atlas_middle_east/syria_pop.jpg

Die Provinzen:

DIMASHQ, RIF DIMASHQ, AL-HASAKAH, AL-LANDHIGIYAH, AL-QUNAYTIRAH, AR RAQQAH, AS SUWAYDA, DARA, DAYRAZZAWR, HALAB, HAMAH, HIMS, TARTUS UND IDLIB

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde betreut von Herrn Prof. Dr. Wilfried PROBST, Universität Flensburg, Herrn Prof. Dr. Uwe NEIS, Technische Universität Hamburg-Harburg und Herrn Prof. Dr. Gerd Jürgen MÜLLER, Universität Flensburg. Ihnen allen danke ich für die fachliche Betreuung und freundliche Unterstützung.

Ich danke den deutschen und syrischen finanziellen Förderern dieses Projekts, die den Bau der Versuchsanlage in Syrien mitfinanzierten, der Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ), der syrischen Regierung und der deutschen Botschaft in Damaskus, insbesondere der damaligen Referentin für Commercial Attache` Frau Ortrud SANDMANN.

Ich danke auch allen syrischen Behörden und Einzelpersonen, die sich um dieses Projekt verdient gemacht haben, insbesondere das Ministerium für Wohnungsbau und öffentliche Einrichtungen und das Ministerium für höhere Ausbildung.

Mein Dank gilt auch meinem lokalen Betreuer in Syrien, Herrn Dr. Ing. George SAHR, Universität Damaskus.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Ing. Uwe REHLING Universität Flensburg / SESAM, auf dessen Anregung hin das Thema entstanden ist.

Ich danke allen, die mich in meinen Jahren in Deutschland begleitet haben, die Freunde geworden sind und mir geholfen haben, meine Deutschkenntnisse zu verbessern. Insbesondere danke ich Frau Dr. Elfriede BRÜMMER- CHALAF, Hamburg und Herrn Klaus DEHNERT, Soest.

Ein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Wilfried Probst für die freundschaftliche, geduldige und väterliche Betreuung.

Mein Dank gilt insbesondere meinem Mann Ghadfan, der mich in all den Jahren mit nicht enden wollender Unterstützung begleitet hat und der mir den größten Teil dieses Studiums finanziert hat.

Ich möchte diese Arbeit allen, die ich liebe widmen
meiner verstorbenen Mutter Mariam,
meinem lieben Vater Yousef
meinen Brüdern
meinen Freundinnen und Freunden

und Ghadfan
in Dankbarkeit.

Versicherung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Mittel verwendet habe.

Flensburg, den 4. Mai 2005

Abir Mohamed