

Masterarbeit an der
Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen
Weiterbildendes Studium - Wasser und Umwelt -

**Vergleichende Betrachtung der Effektivität und Effizienz von
konventioneller Abwasserbehandlung (mehrstufige Kläranlage)
gegenüber neuartigen, kreislaforientierten Sanitärsystemen
an ausgewählten Beispielen in Syrien**

Guido Zimmermann

Eschborn, Dezember 2006

Verantwortlicher Hochschulprofessor :

Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

Betreuer

Frau Dipl.-Ing. (FH) Christine Werner

Aufgabenstellung für die Masterarbeit
im Weiterbildenden Studium - Wasser und Umwelt -

Thema: Vergleichende Betrachtung der Effektivität und Effizienz von konventioneller Abwasserbehandlung (mehrstufige Kläranlage) gegenüber neuartigen, kreislauforientierten Sanitärsystemen an ausgewählten Beispielen in Syrien

eingereicht von: Dipl.-Wirtsch. Guido Zimmermann
geb. am 12.05.1965 in Höhn

Reg.-Nr.: WU - MA 55 / 06

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jörg Londong

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Christine Werner (GTZ)

Ausgabedatum: 28. März 2006

Abgabedatum: 27. September 2006

Bestätigung durch den Prüfungsausschuss:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Erläuterungen zur Aufgabenstellung

1. Problem- und Zielstellung:

Wichtige Investitionsentscheidungen im Bereich der Abwasserbehandlung/-entsorgung stehen in Syrien an und sollen mit ausländischer, finanzieller Hilfe realisiert werden. Bevorzugt werden zur Zeit konventionelle, technisch anspruchsvolle Abwasserbehandlungssysteme, die sich nach europäischen Standards richten. Der Entscheidungsprozess ist jedoch noch nicht abgeschlossen, so dass auch noch andere, neuartige Sanitärkonzepte in die Diskussion eingebracht werden können.

Ein wichtiges Argument für eine mehr kreislauforientierte Ausrichtung der Abwasserbehandlung/-entsorgung wird, neben der Effektivität und Umsetzbarkeit, die Wirtschaftlichkeit sein.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, kreislauforientierte Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen und im Vergleich mit der traditionellen Kläranlagentechnik, insbesondere deren ökonomische und ökologische Vorteile herauszuarbeiten. Abstriche bei der Entsorgungssicherheit und Hygiene werden hierbei nicht zugelassen. Auf der Grundlage einer systematischen und umfassenden Bestandsanalyse sollen mit Hilfe von Modellrechnungen verschiedene Lösungsansätze entwickelt und ganzheitlich unter technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Aspekten bewertet werden. Kurz- und mittelfristige Übergangslösungen zur schrittweisen Annäherung an die Zielvorstellungen sind hierbei aufzuzeigen. Darüber hinaus ist auch die Übertragbarkeit auf andere Regionen zu prüfen.

2. Schwerpunkte der Bearbeitung

- **BESTANDSAUFNAHME / ISTANALYSE – SYRIEN;**
Darstellung und Erläuterung der relevanten Randbedingungen, insbesondere der demografischen, sozialen, wirtschaftlichen und infrastrukturellen Daten (Einwohner, Haushalte, Industrie sowie Landwirtschaft und deren geplante Entwicklungen), hydrogeologische Daten und Daten zur Landnutzung und Energiewirtschaft, gesetzliche Rahmenbedingungen und Richtlinien der syrischen Wasserwirtschaft, Daten zur Charakterisierung des Wasser- und Abwasseranfalls sowie der bestehenden Abwassersysteme (Abwasserableitung und -behandlung), weitere volkswirtschaftliche Daten (Material- und Technologieverfügbarkeit, Kostenstrukturen)
- **FORMULIERUNG DER ZIELVORSTELLUNGEN /SCHWERPUNKTSETZUNG;**

Aufzeigen der kreislauforientierten Lösungsmöglichkeiten in verschiedenen Ausprägungsstufen (von einfacher Abwasserverwertung bis zur Urinseparation) und besonderer Berücksichtigung der Effektivität, der Umsetzbarkeit und der Wirtschaftlichkeit

▪ ENTWICKLUNG VON LÖSUNGSANSÄTZEN / ALTERNATIVEN

1. Bewertung und Interpretation des Istzustandes und technisch-wirtschaftliche Bewertung der vorhandenen Abwasseranlagen
2. Ableitung von prinzipiellen Lösungsansätzen: Konventionelle Klärtechnik mit und ohne Nährstoffelimination - ggf. verbunden mit verschiedenen Ansätzen der Kreislaufwirtschaft sowie neue Alternativen (Eco-San). Zu beachten sind hierbei die jeweiligen allgemeinen Vor- und Nachteile, die technischen und wirtschaftlichen Aspekte, die Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzbarkeit, die Effektivität, die Stoffstrombilanzen und Energieflüsse, die Konzentrationen, die Hygiene und die Nachhaltigkeit.

Einen besonderen Schwerpunkt bei diesen Untersuchungen soll die Nährstoffelimination im Vergleich mit gezielten Maßnahmen zu Förderung und Optimierung der Verwertung des nährstoffreichen Abwassers als Bewässerungs-/Düngewasser sowie der Möglichkeit der Nährstoffverwertung durch Urinseparation bilden.

▪ AUSWAHL UND BEWERTUNG VON KONZEPTEN/SYSTEMEN DER ABWASSERBEHANDLUNG

"Modellrechnungen" durch Kostengegenüberstellungen, Wirtschaftlichkeits- und Effizienzbetrachtungen sowie Kosten-/Nutzenanalyse

▪ ZUSAMMENFASSUNG, ERGEBNISDARSTELLUNG, EMPFEHLUNGEN

Gesamtbeurteilung und abgeleitet daraus die Vorstellung von kurz- und mittelfristigen Übergangslösungen nach Prioritäten zur schrittweisen Annäherung an die Zielvorstellung

3. Hinweise

Von der GTZ werden dem Bearbeiter die einschlägigen Materialien und Informationen zum Thema zur Verfügung gestellt, insbesondere die Machbarkeitsstudien der KfW und der EIB (European Investment Bank).

Weitere Datenerhebungen im Arbeitsverlauf klärt der Bearbeiter im Einvernehmen mit der GTZ.

Die Bauhaus-Universität wird evtl. anfallende Kosten nicht übernehmen.

Der Stand der Arbeit wird in regelmäßigen Abständen, aber mindestens einmal monatlich, z.B. per E-Mail zwischen Bearbeiter und Prüfern ausgetauscht und

das weitere Vorgehen beraten. Bei größeren Bearbeitungsschwierigkeiten nimmt der Bearbeiter umgehend Kontakt mit dem Erstprüfer auf. Sofern die Absicht besteht, die Bearbeitungsschwerpunkte der Masterarbeit zu ändern oder zu präzisieren, bedarf dies der Zustimmung beider Prüfer

Die beigefügten Hinweise für die Erstellung von Masterarbeiten sind zu beachten. Die Ergebnisse der Masterarbeit sind in Thesen zusammenzufassen. Die Abgabe der Arbeit erfolgt in folgender Form: 3 schriftliche Exemplare, 2 elektronischer Datenträger (Arbeit komplett, ggf. mit Anlagen), 2 Exemplare der Thesen, 2 Erfassungsbelege, 1 Poster (ca. 80 x 80 cm).

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung	1-1
1.1	Einführung in das Thema	1-1
2.	Allgemeine Grundlagen der Düngung	2-1
2.1	Pflanzennährstoffe	2-1
2.1.1	Phosphor	2-1
2.1.2	Stickstoff	2-3
2.2	Grundlagen der Düngung und Düngemittelbedarf	2-5
2.3	Mineraldünger	2-6
2.4	Sekundärrohstoffdünger	2-8
2.4.1	Definition von Abwasser und Abwasserarten	2-8
2.4.2	Wichtige Parameter zur Beschreibung der Beschaffenheit eines Abwassers	2-8
2.4.3	Abwasserteilströme	2-9
2.4.4	Düngen mit Abwasser	2-11
2.4.5	Düngen mit Urin	2-11
2.4.6	Düngen mit Klärschlamm und Fäkalien	2-12
3.	Problem- und Zielstellung der Arbeit	3-1
4.	Wasser- und Abwasserwirtschaft in Barada/Awaj (Syrien)	4-1
4.1	Allgemeine Beschreibung der Projektregion	4-1
4.1.1	Klimatische Bedingungen	4-2
4.2	Gegenwärtiger Stand der Wasser- und Abwasserwirtschaft in der Projektregion	4-4
4.2.1	Zustand der Wasserversorgung	4-5
4.2.2	Zustand der Abwasserversorgung	4-5
5.	Erfolgsparemeter einer Abwasserverwertung in der Landwirtschaft	5-1
5.1	Wasserknappheit	5-1
5.2	Fehlen von pflanzen- und bodenschädlicher Bestandteile im Abwasser	5-1
5.3	Vorhandsein von geeigneten Flächen	5-6
5.4	Akzeptanz in der Bevölkerung	5-6
5.5	Nutzenvorteil für die Landwirtschaft	5-7
5.6	Möglichkeit der Überbrückung düngerefreier Perioden	5-7
6	Modellrechnungen für verschiedene Abwasserentsorgungssysteme/ Kläranlagentypen	6-1
6.1	Generelle Zielsetzungen für das Gesamt-Entsorgungssystem	6-1
6.2	Zielsetzungen für die Reinigungssysteme im Speziellen	6-1
6.3	Generelle Bemessungsparameter	6-2

6.4	Aufbereitung der Kostendaten	6-3
6.5	Investitionskosten	6-4
6.5.1	Verrechnung von Investitionen	6-5
6.5.2	Verrechnung von Reinvestitionen	6-5
6.5.3	Nutzungsdauer	6-5
6.6	Betriebskosten	6-6
6.6.1	Energiekosten	6-7
6.6.2	Instandhaltungskosten	6-7
6.6.3	Personalkosten	6-7
6.6.4	Sonstige betriebliche Kosten	6-8
6.7	Dynamische Kapitalwertmethode	6-8
6.7.1	Untersuchungszeitraum	6-8
6.7.2	Zinssätze	6-9
6.7.3	Verwendete Formeln für die Berechnung der Jahreskosten bzw. der Projektbarwerte	6-9
6.8	Nutzenparameter der Abwasserwertung	6-9
6.8.1	Mineraldünger-Ersatz und Nährstoffrecycling	6-9
6.8.2	(Trink-) Wassereinsparung	6-11
6.8.3	Energieeinsparung	6-11
7	Modellrechnung 1 : Belebungsgraben (Extended aeration / Oxidation ditch) mit Nährstoffelimination (Nitrifikation/Denitrifikation)	7-1
7.1	Art und Herkunft des Datenmaterials	7-1
7.2	Aufbau und Beschreibung der Anlage	7-1
7.2.1	Mechanische Vorreinigung	7-3
7.2.2	Mechanisch-Biologische Reinigung	7-4
7.2.3	Weitergehende Reinigung	7-5
7.2.4	Schlammbehandlung	7-6
7.3	Aufbereitung der Kostendaten	7-6
7.4	Kostenbetrachtung	7-7
7.4.1	Investitionskosten	7-7
7.4.2	Betriebskosten	7-10
7.4.3	Projektkostenbarwerte / Jahreskosten	7-12
7.5	Kostenbetrachtung der Abwasserleitung	7-15
7.6	Input / Output Modell der Stoffströme, Kosten- /Nutzenparameter der Abwasserwertung	7-15
7.7	Bewertung	7-16
8	Modellrechnung 2 : Pflanzenkläranlage	8-1
8.1	Art und Herkunft des Datenmaterials	8-1
8.2	Aufbau und Beschreibung der Anlage	8-1
8.2.1	Mechanische Vorreinigung	8-3
8.2.2	Mechanisch-Biologische Reinigung	8-3
8.2.3	Schlammbehandlung	8-5
8.2.4	Gebäude, Erschließung	8-5
8.3	Aufbereitung der Kostendaten	8-5
8.4	Kostenbetrachtung	8-6
8.4.1	Investitionskosten	8-6
8.4.2	Betriebskosten	8-7
8.4.3	Projektkostenbarwerte / Jahreskosten	8-8
8.5	Kostenbetrachtung der Abwasserleitung	8-10

8.6	Reinigungsleistung	8-11
8.7	Input / Output Modell der Stoffströme, Kosten- /Nutzenparameter der Abwasserverwertung	8-11
8.8	Bewertung	8-12
9	Modellrechnung 3 : Urinseparations Dehydrationsstoiletten (Trockentoiletten mit Urinseparation)	9-1
9.1	Art und Herkunft des Datenmaterials	9-1
9.2	Aufbau und Beschreibung des Sanitärsystems Trockentoilette mit Urinseparation	9-1
9.3	Aufbereitung der Kostendaten	9-4
9.4	Kostenbetrachtung	9-4
9.4.1	Investitionskosten	9-4
9.4.2	Betriebskosten	9-6
9.4.3	Projektkostenbarwerte / Jahreskosten	9-7
9.5	Kostenbetrachtung der Abwasserleitung	9-9
9.5.1	Investitionskosten	9-9
9.5.2	Betriebskosten	9-10
9.5.3	Projektkostenbarwerte / Jahreskosten	9-10
9.6	Input / Output Modell der Stoffströme, Kosten- /Nutzenparameter der Abwasserverwertung	9-12
9.7	Bewertung	9-13
9.7.1	Gesamtbetrachtung der Jahreskosten	9-13
10	Vergleich der Verfahren und Zusammenfassung	10-1
11	Literaturverzeichnis	11-1

1. Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Die derzeitige Situation der Abwasserbehandlung in der Arabischen Republik Syrien ist sehr unbefriedigend. Wesentliche Anforderungen an ein Entsorgungssystem werden nicht erfüllt, es ergeben sich ernste Gefahren für die Gesundheit der Bevölkerung. Aus diesem Grund sind mit ausländischer finanzieller Hilfe Vorhaben geplant, um die Situation zu verbessern. Die Investitionsentscheidungen stehen derzeit an. Bevorzugt werden zurzeit konventionelle, technisch anspruchsvolle Abwassersysteme nach europäischen Standards (zentrale Abwasserentsorgung über die Schwemmkanalisation).

Die Vorteile der konventionellen Abwassersysteme liegen in deren erwiesenermaßen hohen Sicherheit und Zuverlässigkeit und in ihrem hohen Nutzungskomfort.

Hingegen haben diese Systeme auch einige Nachteile, welche insbesondere in wasserarmen Gebieten wie Syrien in Betracht zu ziehen sind:

- Konventionelle Abwassersysteme funktionieren nur bei ausreichendem Wasserverbrauch. Insgesamt gehen sie verschwenderisch mit Wasser um. Kostbares Trinkwasser wird für niederwertige Zwecke eingesetzt (z.B. zur Toilettenspülung). Wasser wird verschmutzt und muss aufwendig wieder gereinigt werden.
- Durch die Einleitung der Abwässer in die Vorfluter werden natürliche Stoffkreisläufe unterbrochen, Rohstoffe (wie z.B. Phosphor, Kalium etc.) gehen für geologische Zeiträume verloren. Hohe Energiemengen müssen aufgewendet werden um Ersatzgüter zu schaffen (wie im Falle von Stickstoff).
- Hohe Kosten durch Orts- und Transportkanäle entstehen.

An diesen Nachteilen konventioneller Abwassersysteme setzen Kreislauforientierte Sanitär- oder Abwasserversorgungskonzepte an. Deren Ziele sind:

- Eindämmung der Verschwendung von Wasser
- Schließen von Stoffkreisläufen
- Errichtung von kostengünstigen, dezentralen Anlagen zur Abwasserbehandlung

Der Entscheidungsprozess ist in den zuständigen Institutionen noch nicht abgeschlossen. Neuartige Sanitär- und Abwasserkonzepte können noch in die Diskussion eingebracht werden. Es erscheint daher sinnvoll, die verschiedenen Konzepte der Abwasserentsorgung nach einheitlichen Kriterien zu bewerten und die Ergebnisse zu vergleichen.

Nach [Rudolph (2001)] geht es bei der Entwicklung einer Abwasserversorgung für die Zukunft weniger um Detailverbesserung an Systemkomponenten, als um die Demonstration der Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit von Konzepten, welche den langfristig orientierten, ökologischen Notwendigkeiten genügen.

2. Allgemeine Grundlagen der Düngung

2.1 Pflanzennährstoffe

Zu den Hauptnährstoffen einer Pflanze zählen die Elemente Stickstoff (N), Phosphor (P), und Kalium (K). Weitere sekundäre Hauptnährstoffe sind Mg, S, Ca, Na sowie die Spurennährstoffe Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl.

Die Nährstoffe werden über die Wurzeln der Pflanzen als gelöste Mineralstoffe mit dem Wasser aus dem Boden (Bodenlösung) aufgenommen. Pflanzen können Nährstoffe aus dem Bodenmaterial herauslösen entweder in Symbiose mit Pilzen auf der Wurzel (Mykorrhiza) oder durch die Abgabe von organischen Säuren. Bodenwasser und pH-Wert des Bodens bestimmen die Löslichkeit und damit die Verfügbarkeit für die Pflanze [Albert (2003)]. Kohlenstoff wird über die Blätter als Kohlendioxid aus der Luft bezogen (Photosynthese).

Angegeben werden können die chemischen Symbole für die Nährstoffe in der Elementform (P, K, Mg, Ca oder Na) oder in der Oxidform (P_2O_5 , K_2O , MgO , CaO , oder Na_2O). Die Umrechnung erfolgt im Verhältnis der Molekulargewichte ($P \cdot 2,29 = P_2O_5$; $K \cdot 1,21 = K_2O$).

Pflanzennährstoffe sind direkt oder indirekt am Stoffwechsel von Pflanzen beteiligt und fördern das Wachstum der Pflanze. Jeder Nährstoff erfüllt eine bestimmte Funktion und kann nicht durch einen anderen Stoff ersetzt werden. Fehlt ein Nährstoff oder ist er nicht in ausreichender Menge vorhanden, werden Mangelsymptome sichtbar [Albert (2003)]. Der Chemiker Justus von Liebig (1855) hat erkannt, dass Pflanzen die Nährstoffe in gewissen Verhältnissen benötigen (z.B.: C:N:P=106:16:1) und dass der Nährstoff, der der Pflanze verhältnismäßig am geringsten zur Verfügung steht, das Wachstum der Pflanze einschränkt (Minimumgesetz). Wird ein Nährelement hinzugegeben, das bereits im Überfluss vorhanden ist, hat dies keinen Einfluss auf das Wachstum. Georg Liebscher (1895) modifizierte dieses Gesetz zum Optimumgesetz, das besagt, dass der Minimumfaktor um so stärker ertragswirksam ist, je mehr die anderen Faktoren im Optimum sind. Die Limitierung dieser Gesetze wird durch das Ertragsgesetz (J.H. von Thünen, J. Turgot, E.A. Mitscherlich – „Gesetzes vom abnehmenden Ertragszuwachs“ oder „Das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages“) formuliert, nämlich, dass ab einer bestimmten Ausbringungsmenge an Dünger (Nährstoffe) der Ertragszuwachs je zusätzlich ausgebrachter Düngemittelseinheit abnimmt und sogar unter ein Niveau führen kann, das ohne Düngemittel erreicht worden wäre. All diese Gesetze sind heute noch gültig und stellen die wichtigsten zu beachtenden Grundsätze bei jeder Düngung dar.

Von größter Bedeutung für ein ergiebiges Pflanzenwachstum ist die Versorgung der Pflanzen mit den Kernnährstoffen Phosphor (P_2O_5), Stickstoff (N) und Kalium (K_2O).

Eine rein natürliche Nährstoffversorgung der Böden vollzieht sich sehr langsam über die Verwitterung von Gesteinen, der Umwandlung von unlöslichen Carbonate, Silicate, Phosphate der gesteinsbildenden Mineralien in lösliche Salze, die von Pflanzen aufgenommen werden können oder der Verrottung von Pflanzenteilen etc..

Die von der Pflanze aufgenommenen Nährstoffe werden mit der Ernte abtransportiert. Bei intensiverer Bewirtschaftung eines Feldes hätte dies zur Folge, dass die Menge der benötigten Nährstoffe auf rein natürliche Art nicht schnell genug nachgeliefert werden könnte. Wird die Rückfuhr der durch die Ernte entzogenen Nährstoffe nicht auf andere Art und Weise sichergestellt, käme es zu einer Auslaugung der Böden und damit zu einem abnehmenden Ertrag.

2.1.1 Phosphor

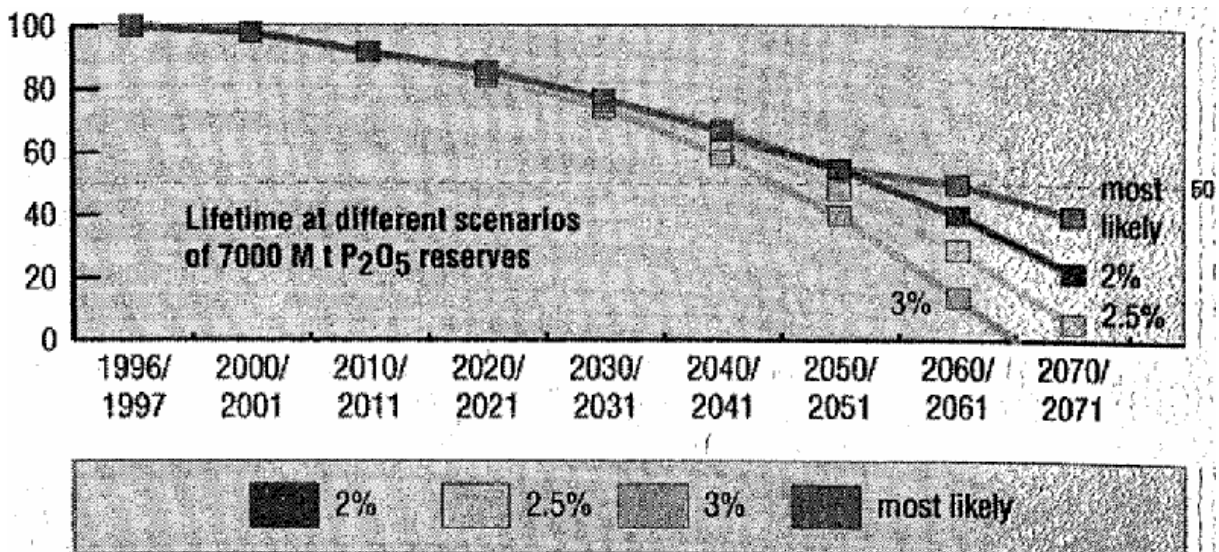
Phosphor ist ein sehr reaktives Element und tritt infolgedessen nur in Verbindungen mit anderen Elementen als Phosphat auf. Eine ganze Reihe von Calciumphosphatmineralien werden unter der

Bezeichnung Apatit zusammengefasst. Apatit ist von griechisch „apatos“ (= trügerisch) abgeleitet, weil es anderen Mineralien wie Aquamarin, Amethyst und Olivin ähnelt. Apatit kommt als Begleitmineral in verschiedenen magmatischen Gesteinen vor, daneben auch in geschichteten marinen Sedimenten. Das wirtschaftlich bedeutendste Mineral zur Phosphorgewinnung ist Fluorapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6$) [Bonewitz (2005)].

Phosphor ist ein begrenzt zur Verfügung stehender Rohstoff und wird in einem überschaubaren Zeitraum für die Massenproduktion nicht mehr zur Verfügung stehen. Zurzeit werden jährlich ca. 40 Mio. Tonnen an Phosphor (P_2O_5) von der Düngemittelindustrie verbraucht, die mit 80-85 % des Gesamtverbrauchs an Phosphor der Hauptabnehmer sind. Weitere wichtige Nutzungen sind die als Zusatz für Futtermittel und in Wasch- und Reinigungsmitteln [Büchel et al, (1999)].

Je nach Literaturquelle und festgelegten Rahmenbedingungen (Bevölkerungsentwicklung, Recycling, Bodenbearbeitung, Düngungstechniken, Gentechnik-Entwicklungen etc.) reichen die Phosphorvorräte noch für knapp 40 bis 1000 Jahre. [Lindenthal (2000), Wagner (2002)]. Bei einer, von der Düngemittelindustrie, prognostizierten Steigerung des Phosphatverbrauchs von 3 % pro Jahr, wären die Phosphatreserven bereits schon vor dem Jahr 2070 aufgebraucht. Nach anderen Schätzungen, wie die z.B. des Umweltbundesamtes (UBA, 2001) werden die wirtschaftlich abbauwürdigen Vorkommen noch etwa 80 Jahre die weltweite Versorgung sicherstellen können. Oldenburg (2002) liefert dazu folgende Verbrauchs-Szenarien mit den Folgen für die weltweiten P_2O_5 -Reserven.

Abb. 2-1: Abnahme der weltweiten P_2O_5 Reserven bei verschiedenen Verbrauchs-Szenarien [Oldenburg (2002)]



Die im Tagebau abgebauten Gesteine enthalten meist nur 5 – 40 % Phosphat. Es ist leicht einzusehen, dass die Gesteine mit hohem Fremdstoffanteil höhere Kosten bei der Produktion entstehen lassen. Insbesondere dann, wenn unerwünschte Schwermetalle, wie z.B. Cadmium aufwendig entfernt werden müssen [Robisch (2003)]. 2-10 % der derzeitigen Phosphor-Düngerpreise resultieren aus den Kosten der Cadmium-Entfernung [Rudolph (2001)]. Tendenz steigend, da viele Länder Cadmiumgrenzen für Phosphatdünger vorschreiben, die unterhalb der Durchschnittskonzentrationen heute bekannter Phosphorreserven liegen [Lange, Otterpohl (2000)]. So gibt Hoogenkamp (1992) an, dass die bekannten Phosphorlagerstätten mit Cadmium (bis zu 60 mg/kg) und Uran (bis zu 200 mg/kg) verunreinigt sind.

Ohne Phosphor ist kein Pflanzenwachstum möglich. Es ist unverzichtbar bei vielen biologischen Prozessen insbesondere beim Energiestoffwechsel und der Synthese von Aminosäuren und Proteinen [Pinnekamp (2002)] darüber hinaus ist es Bestandteil von Zellplasma, Knochen und Nervenfasern aller lebenden Organismen [Hopp (2000)]. Zur Deckung des täglichen Bedarfes

nimmt der Mensch ca. 0,75 g P durch pflanzliche und tierische Nahrungsmittel auf, scheidet aber den größten Teil wieder aus, der sich so im Abwasser wiederfindet [Koppe, Stozek (1993)].

Im Boden kommt Phosphor in anorganischen oder organischen Bindungsformen (Erntereste, Abbauprodukte organischer Düngung etc.) vor. Phosphor wird von der Pflanze über die Wurzel in Form von Orthophosphat aufgenommen. Der Phosphorvorrat im Boden, die Temperatur und die Bodenstruktur sind für die Aufnahme bestimmend. Trockenheit, eine kalte Witterung oder verdichtete Böden führen zu einer eingeschränkten Aufnahme von Phosphor [Schilling (2000)].

Hinsichtlich der Löslichkeit sollte erwähnt werden, dass stabiles Phosphat, das den größten Teil des Bodenphosphates ausmacht, kaum pflanzenverfügbar ist. Hierzu gehören Calcium-, Eisen- und Aluminiumphosphate als mineralische sowie Phytate als organische Bindungsform. Auch führen Alterungsprozesse dazu, dass zunächst lösliche oder labile (leicht gebundene) Phosphate mit der Zeit fester werden. Bereits ca. 30 Tage nach der Düngung ist nur noch 50 % des ausgebrachten Phosphates für die Pflanzen sofort verfügbar. Nach weiteren 170 Tagen nur noch 40 % [Richter und Suntheim (1996)].

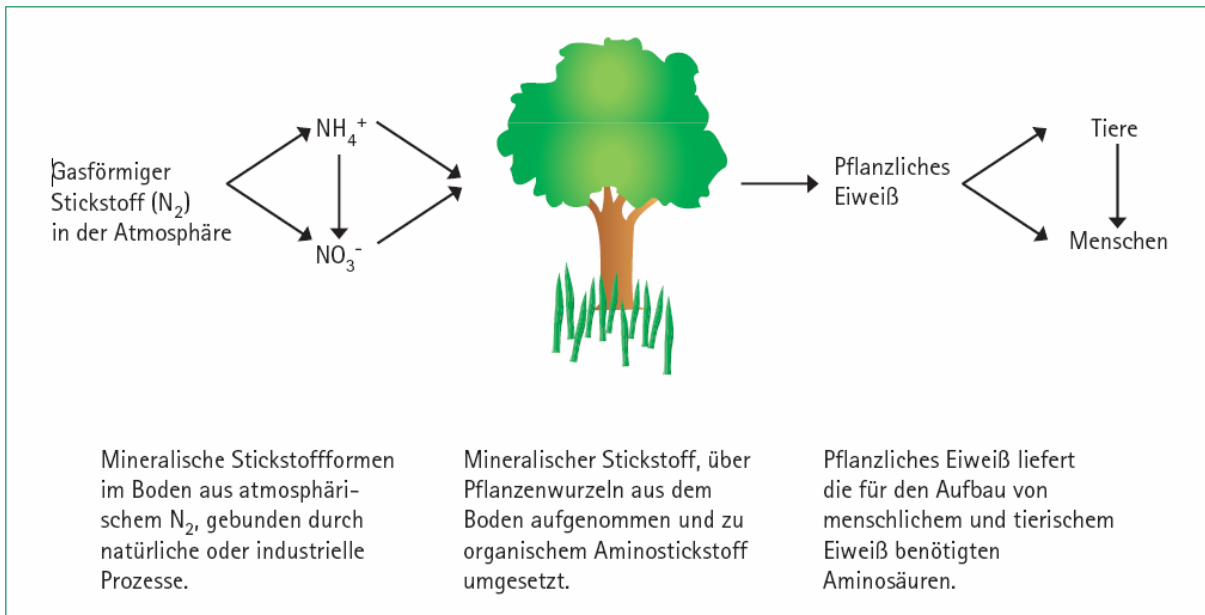
Die Auswaschungsgefährdung von Phosphor im Boden ist, durch die starke Bindung von löslichem Phosphat an die Bodenpartikel, gering und deutlich niedriger anzusetzen als wie zum Beispiel bei Stickstoff oder Kali. Die Verluste liegen i.d.R. unter 10 kg P_2O_5 /ha [Albert (2003)].

2.1.2 Stickstoff (lat. nitrogenium; von altgriech. Laugensalz;)

Stickstoff kommt in der Natur sehr häufig vor, jedoch kaum in der atomaren Form sondern als molekularer Stickstoff N_2 . In dieser Form hat er einen Anteil in der Erdatmosphäre von 78 %. In Mineralien ist Stickstoff kaum anzutreffen. Er ist Bestandteil von Aminosäuren in Proteinen, von DNA und Coenzymen und wird von allen Lebewesen benötigt.

Für eine Stickstoffzufuhr im Boden sorgen nitrifizierende Bakterien (Knöllchenbakterien), die als Symbioten in den Wurzeln der Leguminosen (Erbsen, Bohnen, Linsen; Luzerne, Klee) leben und den Stickstoff aus der Luft über organische Zwischenverbindungen in Ammoniumsalze umwandeln. Die Größenordnung der Bindung von atmosphärischem Stickstoff durch freilebende Mikroorganismen wird mit 5-15 kg/ha bei ackerbaulicher Nutzung angenommen [BAD (2006)].

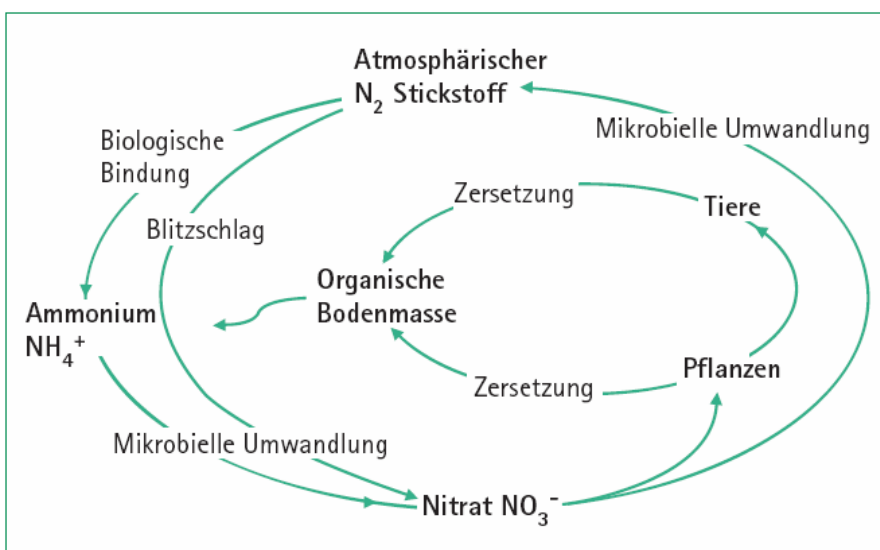
Abb. 2-2: Der Weg von Stickstoff aus der Luft bis zum menschlichen Eiweiß [BAD (2006)]



Eine weitere Überführung von Stickstoff in eine von Pflanzen verwertbare Form geschieht bei der Entladung von Gewittern (\rightarrow Sauerstoff und Stickstoff \rightarrow Stickstoffoxide \rightarrow Regenwasser \rightarrow Salpetersäure \rightarrow im Boden \rightarrow Nitrate). Auf diese Weise können in niederschlagsreichen Gebieten jährlich 20-25 kg N/ha durch Regenfälle dem Boden zugeführt werden [Neubauer (1999)].

Alle Pflanzen, Tiere und die Menschen sind auf den Stickstoffkreislauf in der Biosphäre angewiesen. Die Pflanze baut aus dem Stickstoff pflanzliches Eiweiß auf, das Mensch und Tier als Nahrung und wiederum zum Aufbau des eigenen Körpereiwisses dient. Bei einem Körpergewicht von 75 kg beträgt der tägliche Eiweißbedarf eines Erwachsenen ca. 60 g Protein und dies entspricht in etwa 10 g Stickstoff. Der größte Teil des Stickstoffs wird wieder abgebaut und mit Harn und Kot ausgeschieden, die für die Pflanzen gut verwertbar sind. So bleibt der Stickstoff im Kreislauf und wird wieder und wieder verwertet. Diesen Kreislauf hat jedoch der Mensch unterbrochen, seitdem die ausgeschiedenen Stickstoffverbindungen Kanäle und Kläranlagen füllen, dort kostspielig abgebaut und die Restmengen in Vorfluter geleitet werden. Eine vereinfachte Darstellung des komplexen Stickstoffkreislaufes findet sich in Abb. 2-3.

Abb. 2-3: Vereinfachter Stickstoffkreislauf in der Natur [BAD (2006)]



Stickstoff ist, im Gegensatz zum Phosphor, keine endliche Ressource. Durch die Ammoniak-Synthese, dem Haber-Bosch Verfahren, kann Stickstoff industriell hergestellt werden. Dazu ist jedoch ein enorm hoher Energieeinsatz nötig, der je nach eingesetzter Technik bei 27 – 35 MJ/kg NH_3 liegt [Jenssen (2003)].

Der Gesamtstickstoffgehalt der Böden ist stark abhängig von deren Kohlenstoffgehalt. Er wird durch Klima und Vegetation, Bodenart, Geländegestalt und Maßnahmen des Landwirts, wie Bodenbearbeitung, beeinflusst.

2.2 Grundlagen der Düngung und Düngemittelbedarf

Mit der Düngung soll die Bodenfruchtbarkeit erhalten und gefördert werden, indem die Pflanze mit notwendigen Nährstoffen versorgt wird. Die Düngung hat sich zu orientieren an die im Boden bereits verfügbaren Nährstoffe, den klimatischen Bedingungen und an den Bedarf der Pflanzen hinsichtlich Menge, Art und Zeit. Eine ausgeglichene Nährstoffbilanz liegt vor, wenn die Zufuhr über die Düngung plus natürlicher Einträge (Verwitterung, Erntereste etc.) gleich der Abfuhr über das Erntegut inklusive der natürlichen Verluste (Auswaschung etc.) ist.

Um als Dünger zugelassen zu werden, muss die Wirkung des Düngers (gegenüber ungedüngt) im Versuch nachgewiesen werden. Desweiteren darf der Dünger auch in seinen Nebenbestandteilen und Zusätzen keine unerwünschten Verunreinigungen aufweisen und muss absolut unbedenklich im Hinblick auf Nahrungsprodukte sein [Niederste-Hollenberg (2003)].

Unter anderem regelt in Deutschland die Düngeverordnung die Grundsätze der Guten Fachlichen Praxis beim Düngen. Einige darin enthaltenen Vorgaben sind nachfolgend aufgelistet:

- Nur aufnahmefähige Böden dürfen gedüngt werden (d.h. wassergesättigte, gefrorene oder schneebedeckte Böden sollen nicht gedüngt werden).
- Keine Düngung im Winter oder während der Vegetationsruhe.
- Stickstoffhaltige Dünger sind nur in Zeiten aufzubringen, in denen die Pflanzen den Stickstoff aufnehmen können.

Nach Niederste-Hollenberg (2003) gibt das Umweltbundesamt als mittlere Bedarfsmenge bei verschiedenen Fruchtarten eine Düngemenge von 50 kg/ha Phosphat P_2O_5 an. Für Stickstoff liegt nach Quade (1988) das Optimum der Düngung von Weizen zwischen 80 und 250 kg/ha. Generell empfiehlt Simon et al. (2003) für salztolerante Nutzpflanzen (z.B. Getreide) einen Stickstoffbedarf von 120 kg/(ha*a) anzusetzen.

Im Anwendungsjahr wird von den Pflanzen meist nur ein Teil der aufgebrauchten Nährstoffe verwertet. So ist zu beachten, dass nur 10 – 60 % des Stickstoffs aus organischen Düngern, 40 – 80 % des Stickstoffs aus Gülle und Stallmist, 10 – 25 % des Phosphats und 40 – 80 % des Kaliums im Anwendungsjahr verwertet werden [LfL (2003)].

Fazit: Das Durchführen von Bodenanalysen kombiniert mit fachmännischem Umgang mit sämtlichen Düngemittel sowie guten Ausbringungs- und Einarbeitungstechniken führen zu besten und nachhaltigen Ertragsergebnissen. Überdüngung und Auswaschung von Nährstoffen und der damit u.U. einhergehenden Eutrophierung von Gewässern kann so vorgebeugt werden.

2.3 Mineraldünger

Die landwirtschaftliche Produktion stützt sich heute maßgeblich auf den Einsatz von Mineraldüngern, der eine Reihe von Vorteilen gegenüber den sogenannten organischen Düngern hat, aber auch deutliche Nachteile.

Die Vorteile des Mineraldüngers liegen, gegenüber den organischen Düngern liegen vor allem in der,

- gezielten Dosierbarkeit,
- der schnellen und berechenbaren Wirkung und
- der Verfügbarkeit der Düngemittel zur gewünschten Zeit.

Neben diesen Vorteilen gibt es aber auch eine Reihe von Nachteilen. Diese sind insbesondere

- der enorme Energieaufwand bei der Herstellung (z.B. Stickstoffdünger),
- die Anreicherung giftiger Substanzen im Boden bei der Düngung mit Cadmiumhaltigen-Phosphor, und
- der Verbrauch begrenzter, lebenswichtiger Rohstoffe (z.B. Phosphor)

Laut Statistischem Bundesamt (2000) wurden 1997 weltweit 1372 Mio. t Nährstoffe ausgetragen. Dies entspricht 90,9 kg Nährstoffe pro ha, bezogen auf Ackerland und Dauerkulturen (einschl. Brache) [Niederste-Hollenberg (2003)].

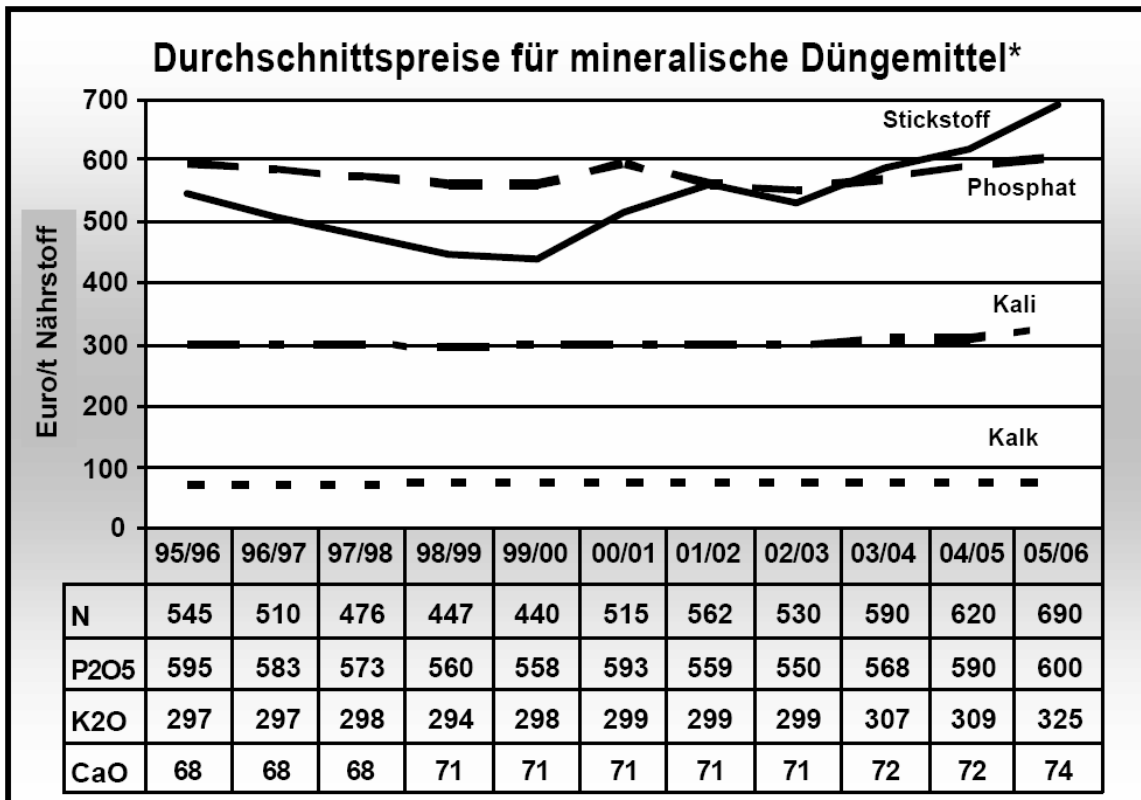
Folgenden Mineraldünger werden in der Landwirtschaft eingesetzt:

- Phosphate, wie das bekannte „Superphosphat“, eine Mischung aus Calciumphosphat und Calciumsulfat (=Gips). [Wawra (2003)]
- Kalidünger, meist bestehend aus Kaliumchlorid (etwa 90 % der weltweit verbrauchten Kalidünger), wird hauptsächlich für die Gründüngung eingesetzt,
- Stickstoffdünger, die überwiegend durch die Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren) gewonnen werden und in folgende Gruppen aufgeteilt werden [Niederste-Hollenberg (2003)]:
 - Ammonium-, Nitrat- und Ammonitratdünger (enthalten als Pflanzennährstoff Ammonium oder dessen Grundform Ammoniak)
 - Amiddünger und Kombinationen (z.B. Harnstoff*)
 - N-Depotdünger (Kondensationsprodukte aus Harnstoff und Aldehyden)

Anteile von P_2O_5 in verschiedenen Phosphatdüngern [Niederste-Hollenberg (2003)]:

Superphosphat:	– 19 – 20 %
Tripelsuperphosphat:	– 40 %
<u>Ammoniumphosphate:</u>	
• Monoammoniumphosphate:	11-13 % N und 48-53 % P_2O_5
• Diammoniumphosphate:	16-18 % N und 46-48 % P_2O_5
• Ammoniumpolyphosphate:	Lösungen von 11 % N und 37 % P_2O_5
Schmelzphosphat:	ca. 21 %
Sinterphosphat:	ca. 42 %
Thomasphosphat:	10-18 %
Knochenmehl:	20 %

Tab. 2-1: Durchschnittspreise für mineralische Düngemittel



Wie sich aus der o.a. Tabelle 2-1 entnehmen lässt, steigt der Preis, besonders für Stickstoffdünger, aber auch Phosphatdüngemittel, tendenziell an. Es ist anzunehmen, dass diese Entwicklung mit knapper werdenden Rohstoffen und steigenden Energiepreisen anhält und sich zudem beschleunigt.

2.4 Sekundärrohstoffdünger

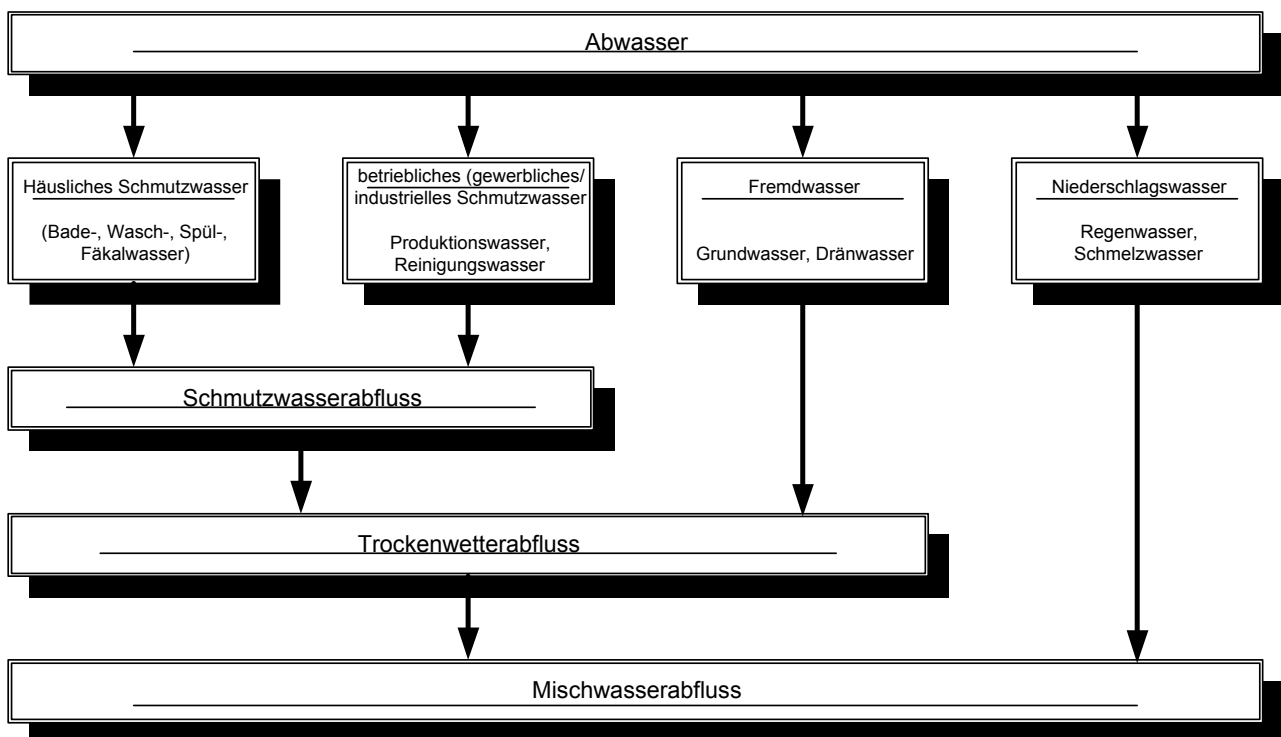
2.4.1 Definition von Abwasser und Abwasserarten

Abwasser wird im Abwasserabgabengesetz definiert als das

„durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser, sowie das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser). Als Schmutzwasser gelten auch die aus Anlagen zum Behandeln, Lagern, und Ablagern von Abfällen austretenden und gesammelten Flüssigkeiten“.

Abwasser dient als Oberbegriff für verschiedene Wasserarten. Eine Zusammenstellung findet sich in der nachfolgenden Abbildung 2-4 wieder.

Abb. 2-4: Abwasserarten [Feldhaus (2003)]



2.4.2 Wichtige Parameter zur Beschreibung der Beschaffenheit eines Abwassers

Bestimmung organischer Stoffe

Der biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) ist der grundlegende Parameter im Bereich der Klärtechnik und beschreibt den Verschmutzungsgrad des Wassers durch biologisch abbaubare organische Inhaltsstoffe. Per Definition handelt es sich dabei um jene Sauerstoffmenge in mg/l, die für den Abbau der im Wasser enthaltenen organischen Substanzen unter Mitwirkung von Mikroorganismen erforderlich ist. Der anzutreffende Index 5 in der Angabe BSB₅ drückt aus, dass die Messung des Sauerstoffverbrauches nach 5 Tagen abgebrochen wurde [Martz et al. (1990)].

Toxische Stoffe oder schwer abbaubare organische Substanzen können eine brauchbare BSB-Bestimmung stark beeinträchtigen. Deshalb bedient man sich einer zweiten Methode zur Beschreibung des Verschmutzungsgrades, indem man die Abwasserprobe mit einer stark oxidierenden Verbindung (Kalium-Dichromat) vermischt und den Kohlenstoff auf chemischem

Wege oxidiert. Die Sauerstoffmenge in mg/l, welche zur Oxidation der gesamten, also auch der schwer abbaubaren Schmutzstoffe benötigt wird, bezeichnet man als chemischen Sauerstoffbedarf (CSB). Bei häuslichem Abwasser ist das Verhältnis zwischen BSB_5 zu CSB ungefähr 1 : 1,5 -2. Ein Wert > 2 würde bedeuten, dass das Abwasser biologisch schwieriger abzubauen sein wird. Beide Werte (BSB_5 und CSB) sind somit für eine vergleichende Abwägung der Messergebnisse unumgänglich [Martz et al. (1990)].

Nährstoffe

Die beiden wichtigsten Nährstoffe die in dieser Arbeit betrachtet werden müssen ist Phosphat und Stickstoff.

Eine Übersicht über die verschiedenen Stickstoffparameter gibt die nachfolgende Tabelle 2-2.

Tab. 2-2: Stickstoff-Fractionen im Abwasser

N_{org} organischer Stickstoff	TKN	Totaler Kjeldahl-Stickstoff	N_{ges} Gesamt gebundener Stickstoff
NH_4^+-N Ammoniumstickstoff			
$NO_3^- -N$ Nitratstickstoff	$NO_3^- -N$		
$NO_2^- -N$ Nitritstickstoff	$NO_2^- -N$		

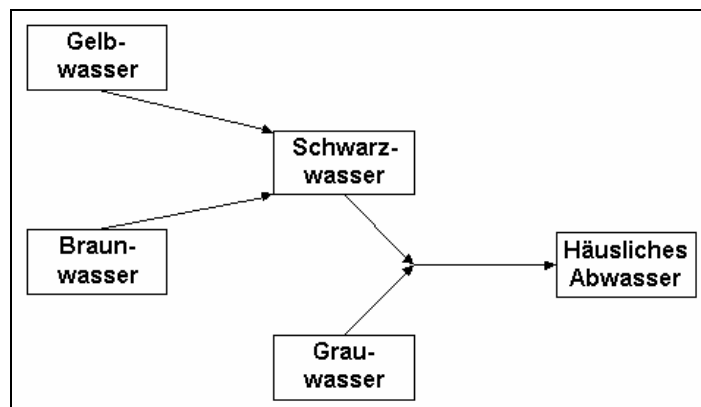
Zur Bestimmung der Stickstoffanteils im Abwasser wird meist der Parameter TKN (totaler Kjeldahl-Stickstoff) benutzt, der sich aus dem organischen Stickstoffanteil und dem Anteil an Ammoniumstickstoff errechnet. Die oxidierten Stickstoffverbindungen (NO_x) sind in der Regel nicht in signifikanten Konzentrationen im Rohabwasser vorhanden und werden daher nicht erfasst.

Der Parameter Gesamtphosphor (P_{ges}) setzt sich aus der Summe von Orthophosphat und organisch gebundenem Phosphat (P_{org}) zusammen.

2.4.3 Abwasserteilströme

Das häusliche Abwasser setzt sich aus mehreren Teilströmen zusammen, die nachfolgend kurz definiert werden

Abb. 2-5: Teilstoffströme des häuslichen Abwassers [Lange, Otterpohl et al. (2000)]



Gelbwasser	Urin, eventuell vermischt mit Spülwasser
Braunwasser	Fäkalien vermischt mit Spülwasser
Schwarzwasser	Urin und Fäkalien vermischt mit Spülwasser (herkömmliches Toilettenwasser)
Grauwasser	Badewasser, Putzwasser, Waschwasser, Wasser aus der Küche

Betrachtet man die Nährstoffgehalte der verschiedenen Teilstoffströme ergibt sich folgendes Bild :

Tab. 2-3: Spezifische Nährstofffrachten in Abwasserteilströmen in g/(EW*d) [Jönsson et al. (2005/6)]

	N	P	K
Urin	11	0,9	2,4
Fäkalien (Schwarzwasser)	1,5	0,5	0,9
Grauwasser	1,5	0,68	0,79
Häusliches Abwasser	14	2,08	4,09

Tab. 2-4: Spezifische Nährstofffrachten in Abwasserteilströmen in kg/(EW*a) [Jönsson et al. (2005)]

	N	P	K
Urin	4,02	0,33	0,88
Fäkalien (Schwarzwasser)	0,55	0,18	0,33
Grauwasser	0,55	0,25	0,29
Häusliches Abwasser	5,12	0,76	1,5

Die tägliche Urinmenge wird von Naudascher (2001) mit 1,6 l/(EW*d) und der mittlere Faeces-Anfall mit 145 g/(EW*Stuhlgang) angegeben. Überschlagsmäßig kann somit pro Jahr mit ca. 550 l/(EW*a) Urin-Anfall und mit ca. 52 kg/(EW*a) Faeces-Anfall gerechnet werden.

Wie man aus Tabelle 2-4 erkennt, ist Urin mit einem Anteil von ca. 90 % Stickstoff und ca. 65 % Phosphor der Hauptnährstoffträger menschlicher Exkrememente und kann daher als wertvoller Nährstofflieferant betrachtet werden. Grauwasser hingegen enthält nur einen geringen Nährstoffanteil. Der Phosphor-Gehalt des Grauwassers resultiert in erster Linie aus Spül- und Waschmittelzusätzen.

Bei einem Verbrauch von 115 l/(EW*d) ist von nachfolgender Aufteilung auf die Teilströme auszugehen [vgl. Lange, Otterpohl et al. (2000)].

Tab. 2-5: Anfallende (rechnerische) Abwassermengen [Starkl et al. (2005)]

in l/(E*d)	Ohne Wassersparmaßnahmen	Mit Urinentrennung	Mit Wassersparmaßnahmen
Grauwasser	75	75	55
Urin + Braunwasser	40	6,6 - 18	6,6 - 40
Summe	115	81,6 - 93,8	61,6 - 90

Ergänzt man in Tab. 2-6 die Trockentoilette mit Urinseparation und nimmt mögliche Wassersparmaßnahmen hinsichtlich des Grauwasseranfalles war, kann von einer Wasserersparnis von ca. 57 l/(E*d) gegenüber einem herkömmlichen Abwassersystem ohne Wassersparmaßnahmen ausgegangen werden.

Tab. 2-6: Anfallende (rechnerische) Abwassermengen, ergänzt um das System „Trockentoilette mit Urinseparation“

in l/(E*d)	Ohne Wassersparmaßnahmen	Mit Wassersparmaßnahmen	Trockentoilette mit Urinseparation und Wassersparmaßnahmen
Grauwasser	75	55	55
Urin + Braunwasser	40	6,6 - 40	3 *
Summe	115	61,6 - 90	58

* mit Hygienewasser

2.4.4 Düngen mit Abwasser

Schwarzwasser (Gelbwasser plus Braunwasser) enthält den größten Teil an Nährstoffen, die einer landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt werden könnten.

FAO/RNEA (2000) definieren für Abwasser nach einer mechanisch-biologischen Behandlung das in der Tab. 2-6 aufgelistete Nährstoffpotential.

Tab. 2-6 Nährstoffpotenzial von gereinigtem Abwasser [FAO/RNEA (2000)]
(nach mechanisch-biologischer Reinigung, ohne Phosphorelimination)

	N	P	K
Nährstoffkonzentration mg/l	20 -60 [30]	6 – 15 [10]	10 – 30 [30]
kg/ha bei 10.000 m ³ water/ha (1000mm)	200 – 600	60 – 150	100 - 300

Nach Otterpohl (1999) könnten durch Teilstromstrombehandlung Produkte mit höherer Nährstoffkonzentration gewonnen werden, dies soll im nächsten Kapitel näher beschrieben werden.

2.4.5 Düngen mit Urin

Die Gleichwertigkeit von Urin zu Mineraldünger sieht Simon et al. (2003) grundsätzlich als gegeben an. Wird Urin in die oberste Bodenschicht eingearbeitet, können die Ammoniakverluste unter 10 % gehalten werden. Optimale Ausbringungstechnik mit Schleppschauchverteilern oder Injektoren führen nur zu Verlusten von 1 bis 3 % [Niederste-Hollenberg et al. (2003)].

Eine Urinapplikation salzempfindlicher Arten wie Kartoffeln, Gemüse oder Obst sollte nach Simon et al. (2003) allerdings vermieden werden, kein Problem hingegen wird bei der Düngung salzverträglicher Arten wie Getreide oder Zuckerrüben gesehen.

Neben der direkten Verwertung von Urin in der Landwirtschaft, besteht auch die Möglichkeit Urin gemeinsam mit Gülle auszubringen [Starkl (2005)].

Hinsichtlich der Hygiene ist zu erwähnen, dass Urin grundsätzlich relativ keimarm ist. Eine vermehrte Keimanzahl kann insbesondere dann auftreten, wenn eine Trennung von Fäzes und Urin nicht zu 100 % gewährleistet werden kann [Niederste-Hollenberg (2003)]. In der Praxis ist davon auszugehen, dass eine 100 % Trennung selten realisiert werden kann und daher im Umkehrschluss von einer Verkeimung ausgegangen werden muss. Untersuchungen von Höglund (2001) zeigen jedoch, dass bei einer Speicherzeit von mehr als 6 Monaten bei einer Temperatur von 20°C wahrscheinlich keine pathogenen Keime im Speichertank überleben werden. Wichtig ist jedoch hierbei, dass während der Speicherzeit keine Zufuhr frischen Urins erfolgt.

Nach Höglund (2001) kann Urin, der einer Speicherzeit unter den genannten Bedingungen unterzogen worden ist, bedenkenlos für die Düngung von Pflanzen für die Weiterverarbeitung oder von Futterpflanzen verwendet werden. Sollen Pflanzen gedüngt werden, die zum rohen Verzehr gedacht sind, wird allerdings empfohlen, die Urin Düngung auf dem braunen Boden einzuarbeiten und keine Düngung während der Wachstumsphase der Pflanzen vorzunehmen. Niederste-Hollenberg (2003) führt aus, dass Gelbwasser als Dünger am Besten im Frühjahr, noch vor der Wachstumsperiode ausgebracht werden sollte. So hat das Ammonium Zeit zu Nitrat zu oxidieren und genau zeitgerecht für die Wachstumsphase zur Verfügung zu stehen.

Ungeklärt ist allerdings noch die Frage der Arzneimittelrückstände im Urin. Forschungen auf diesem Gebiet sind bisher noch zu keinem endgültigen Ergebnis gekommen. Es darf nicht

übersehen werden, dass dieser Gesichtspunkt in der Zukunft ein entscheidendes Kriterium für die Wiederverwendung von Urin darstellen wird [Niederste-Hollenberg (2003)]. Inwieweit die Lagerungszeit oder spezielle Behandlungstechniken (UV-Bestrahlung) etc. eine ausreichende Elimination der Medikamentenrückstände herbeiführt, ist somit noch offen.

Gemäß den obigen Ausführungen und in Verbindung mit Kap. 2.4.3 (Abwasserteilströme) kann der Nährstoffgehalt in Urin nach Tab. 2-7 errechnet werden.

Tab. 2-7: Nährstoffgehalt und Düngewert von Urin

Nährstoff	[kg Urin/(EW*a)]	[m ³ Urin/(EW*a)]	Nährstoffgehalt in Urin [kg/m ³]	Mineraldünger-äquivalent	Düngewert Urin [kg/m ³]
N	4,015	0,55	7,3	1	7,3
P	0,33	0,55	0,6	1	0,6
K	0,88	0,55	1,6	1	1,6

Bei einem Pflanzenbedarf von 120 kg N/ha (siehe Kap. 2.2 Düngung) kann somit ca. 16,5 m³ Urin/ha aufgetragen werden. Bezogen auf Phosphor mit einem Pflanzenbedarf von 22 kg P/ha (siehe Kap. 2.2 Düngung) wird 36,5 m³ Urin/ha zur Düngung benötigt.

2.4.6 Düngen mit Klärschlamm und Fäkalien

In der Landwirtschaft in Industrieländern bestehen oftmals Bedenken gegen die Ausbringung von Klärschlamm aufgrund der Schwermetallgehalte. Dieses Argument gegen die Verwendung von Klärschlamm kann aber in einem anderen Land mit weniger Schwerindustrie schnell hinfällig werden. Wichtig wird auch länderübergreifend sein, die Hygieneeigenschaften des zur Verwendung anstehenden Klärschlammes zu optimieren.

ArabTech (2006) geht von den in der Tabelle 2-8 vermerkten Nährstoffkonzentrationen im ge Klärschlamm aus, wobei angenommen wird, das im Jahr der Ausbringung nur ca. 25 – 40 % von N_{org} pflanzenverfügbar sein wird.

Tab. 2-8 Nährstoffkonzentrationen im getrockneten Schlamm [ArabTech (2006)]

Nährstoff	N	P	K
Nährstoff in kg pro to Klärschlamm	30	13,2	2,5
Nährstoff in kg pro m ³ Klärschlamm	19,5	8,6	1,6

Diese Werte finden sich in der Literatur bestätigt. Onnen (2001) nennt einen Stickstoffgehalt im Klärschlamm zwischen 1,87 % bis 6,0 % der Trockensubstanz. Der Nährstoffgehalt im Klärschlamm ohne vorangegangene Phosphorfällung wird dort mit durchschnittlich 2 % beziffert. Klärschlamm mit Phosphorfällung erreicht durchschnittliche Phosphor-Gehalte von 3,9 %.

3. Problem- und Zielstellung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, kreislauforientierte Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen und mit konventioneller Kläranlagentechnik zu vergleichen. Es sollen die ökonomischen und ökologischen Vorteile der kreislauforientierten Abwassersysteme herausgearbeitet werden.

Für Syrien wurden bereits breit angelegte Studien zum Thema Abwasserversorgung durchgeführt, z.B. [KfW (2003)], [Arabtech (2006)], [KfW (2006)]. Diese Studien bieten umfangreiches Datenmaterial, insbesondere für die Region des Barada/Awaj Beckens, welches um Umland der Hauptstadt Damaskus liegt. Aufgrund der guten Datenlage und um Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurde für diese Arbeit ebenfalls diese Region ausgewählt.

Die o.g. Studien konzentrierten sich auf konventionelle Abwasserbehandlungsverfahren. Weder Pflanzenkläranlagen noch kreislauforientierte Verfahren wie z.B. die Nutzung von Dehydrations-toiletten wurden untersucht. Hingegen wurde in den Studien die mögliche Nutzung des Abwassers betrachtet und quantitativ bewertet.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, neben die konventionelle Technik zwei weitere Verfahren der Abwasserbehandlung zu stellen, diese zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Die betrachteten Verfahren sind:

1. Belebungsgraben (Extended aeration / Oxidation ditch) mit Nährstoffelimination (N)

Hierbei handelt es sich um ein erprobtes, zuverlässiges Verfahren welches insbesondere in semi-ariden Gebieten erfolgreich eingesetzt wird. In dieser Studie steht das Verfahren für die Klasse der konventionellen Abwasserbehandlungsverfahren. Das Verfahren ist recht aufwendig, eine zusätzliche Desinfektionsstufe ist erforderlich um hygienisch einwandfreies Abwasser zu erhalten.

2. Pflanzenkläranlage

Pflanzenkläranlagen sind bisher in kleinerem Maßstab erprobt und sind mittlerweile als zuverlässiges System in der Fachwelt anerkannt. Die Pflanzenkläranlage eignet sich konzeptbedingt besonders für dezentrale Lösungen, sie ist als ein naturnahes Verfahren technisch weniger anspruchsvoll und erscheint daher besonders geeignet für Gebiete mit wenig fachspezifisch ausgebildetem Personal.

Die Pflanzenkläranlage zählt nicht zur Gruppe der konventionellen Abwasserbehandlungsverfahren, allerdings ist auch hier eine Schwemmkanalisation erforderlich.

Ein besonderer Vorteil der Pflanzenkläranlage ist, dass keine Desinfektionsstufe erforderlich ist um hygienisch einwandfreies, direkt für die Landwirtschaft nutzbares Abwasser zu erzeugen.

3. Urinseparations-Dehydrations-toiletten-System

Dieses neuartige, kreislauforientierte System verspricht insbesondere eine Verminderung des Wasserverbrauchs und die nahezu vollständige Nutzung der in Abwasser und Fäkalien enthaltenen Nährstoffe. Weiterhin wird erwartet dass diese Lösung besonders kostengünstig ist. Auch hier ist der Einsatz anspruchsvoller Technik nicht notwendig.

Um die Vergleichbarkeit der drei Konzepte sicherzustellen, wurden für alle drei Verfahren die gleichen Bewertungskriterien herangezogen. Es wurde bei allen drei Verfahren davon ausgegangen, dass entsprechende Anlagen in der Region Barada/Awaj errichtet werden.

Für alle Verfahren muss die Funktions- und Betriebssicherheit langfristig gewährleistet sein. Die Anforderungen an die Reinigungsleistung sind für jedes der drei Verfahren gleich hoch. Es werden umfassende Modellrechnungen sowie eine Input/Output Analyse der relevanten Stoffströme vorgenommen.

Abschließend werden die Ergebnisse für die drei Verfahren kurz bewertet und mit Hilfe der dynamischen Kostenvergleichsrechnung miteinander verglichen.

4. Wasser- und Abwasserwirtschaft in Barada/Awaj (Syrien)

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die gegenwärtige Situation und die für die Wasser- und Abwasserwirtschaft wichtigen Randbedingungen in der Region Barada/Awaj vermittelt werden. Neben allgemein zugänglichen Quellen sind die Daten im Wesentlichen aus [KfW (2003)], [Mohamed (2004)], [KfW (2006)], [Arabtech (2006)] entnommen.

4.1 Allgemeine Beschreibung der Projektregion

Die Arabische Republik Syrien ist ein Staat im nahen Osten. Die Fläche des Staates beträgt 185.180 km², das ist ca. die halbe Fläche der Bundesrepublik Deutschland. Bei einer Einwohnerzahl von 20.102.000 (Stand Juli 2006) ergibt sich eine Bevölkerungsdichte von 108 Einwohnern pro km². Die Projektregion Barada/Awaj liegt im Umland von Damaskus.

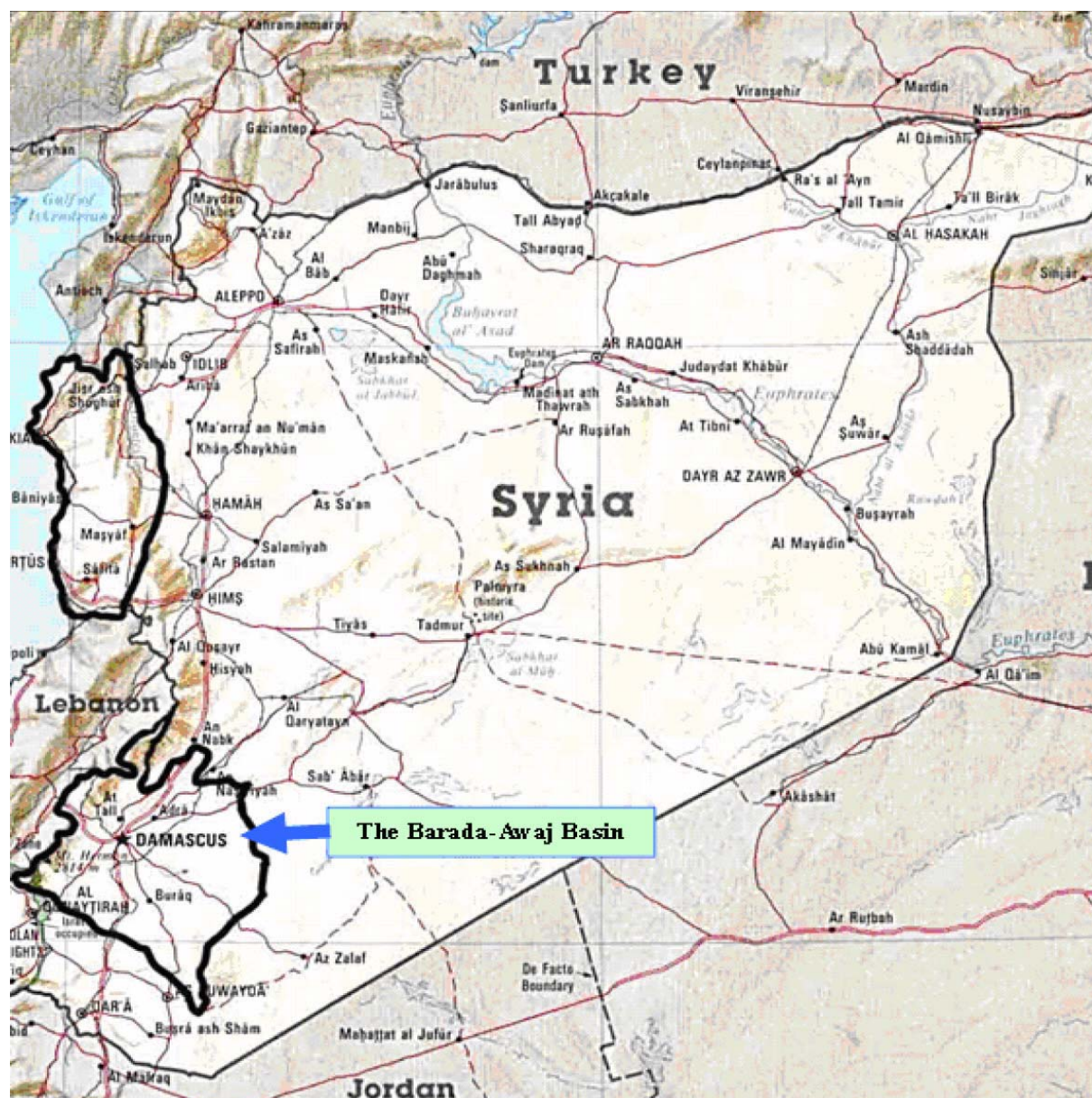


Abb. 4-1 Landkarte von Syrien. Hervorgehoben ist die Projektregion, das Barada/Awaj Becken. (aus [KfW (2003)])

Das betrachtete Gebiet umgibt die syrische Hauptstadt Damaskus und bedeckt eine Fläche von ca. 18.000 km² oder ca. 10% der Fläche Syriens. Im Gebiet leben gemäß einer in 2004 durchgeführten Schätzung ca. 2.272.000 Einwohner, das entspricht ca. 12,8 % der Gesamtbevölkerung Syriens. Die Gebiete in der Peripherie von Damaskus erlebten eine signifikante Bevölkerungszunahme in den letzten Jahrzehnten. Dies führte zu erheblichen Belastungen beim Flächenverbrauch und der Nutzung der natürlichen Ressourcen, insbesondere Wasser.

Das Bevölkerungswachstum betrug in den letzten Jahren ca. 5% Jahr, es wird allerdings erwartet, dass dieser Wert in den kommenden Jahren zurückgeht. Die Einkommen der Bevölkerung sind meist gering, zwei Drittel verdienen weniger als 6.000 Syrische Pfund pro Monat, dies entspricht ca. 92 €. Ca. 31% der Erwerbstätigen verdienen ihr Geld in der Landwirtschaft. Einige Bewohner arbeiten in Damaskus und fahren jeden Tag zur Arbeitsstelle und zurück.

Knapp 60% der kultivierbaren Bodenfläche wird auch landwirtschaftlich genutzt, 8,8 % liegen brach, 31,4 % sind ungenutzt. Die Böden sind sehr fruchtbar, müssen dazu allerdings bewässert werden. Von der landwirtschaftlich genutzten Fläche werden 55% bewässert [KfW (2003)]. Hauptanbauprodukte sind Weizen und Gemüse, sowie Tabak, Oliven und Aprikosen. Es wird ebenfalls Tierhaltung betrieben, der Schwerpunkt liegt in der Aufzucht von Rindern, Ziegen und Geflügel.

In der Region entstanden in den letzten Jahren vielfach wilde Siedlungen auf ursprünglich landwirtschaftlich genutzten Flächen. Diese Art der Landnahme erfolgt unkontrolliert. Generell ist ein Fehlen von Bebauungsplänen und Stadtplanung festzustellen. Eine Folge ist, dass die Entwicklung der Infrastruktur nicht mit dem Bevölkerungswachstum mithält.

4.1.1 Klimatische Bedingungen

Das Barada/Awaj Becken ist gekennzeichnet durch trockene, heiße Sommer und moderat kühle Winter. Aufgrund der Höhenlage können vier klimatische Regionen unterschieden werden (Abb. 4.2): Moderates Klima (> 1.000 m über NN), semi-arid (750 – 1.000 m über NN), arid (650 – 750 über NN) und heißes Wüstenklima (< 600 m über NN). Die in dieser Arbeit betrachtete Region befindet sich im ariden Gebiet mit Niederschlagsmengen zwischen 150 und 200 mm pro Jahr. Von diesem Niederschlag verdunstet ein erheblicher Teil. Regen fällt meist zwischen November und April, im Sommer sind Dürreperioden häufig.

Möglichkeiten, die aus diesen klimatischen Bedingungen folgende Wasserknappheit zu vermindern sind im Wesentlichen:

- Wassersparmaßnahmen
- Erneuerung der Leitungsnetze zur Verminderung von Verlusten durch Lecks
- Nutzung ausreichend behandelten Abwassers.
- Verbesserung der Effizienz der Bewässerungsmaßnahmen

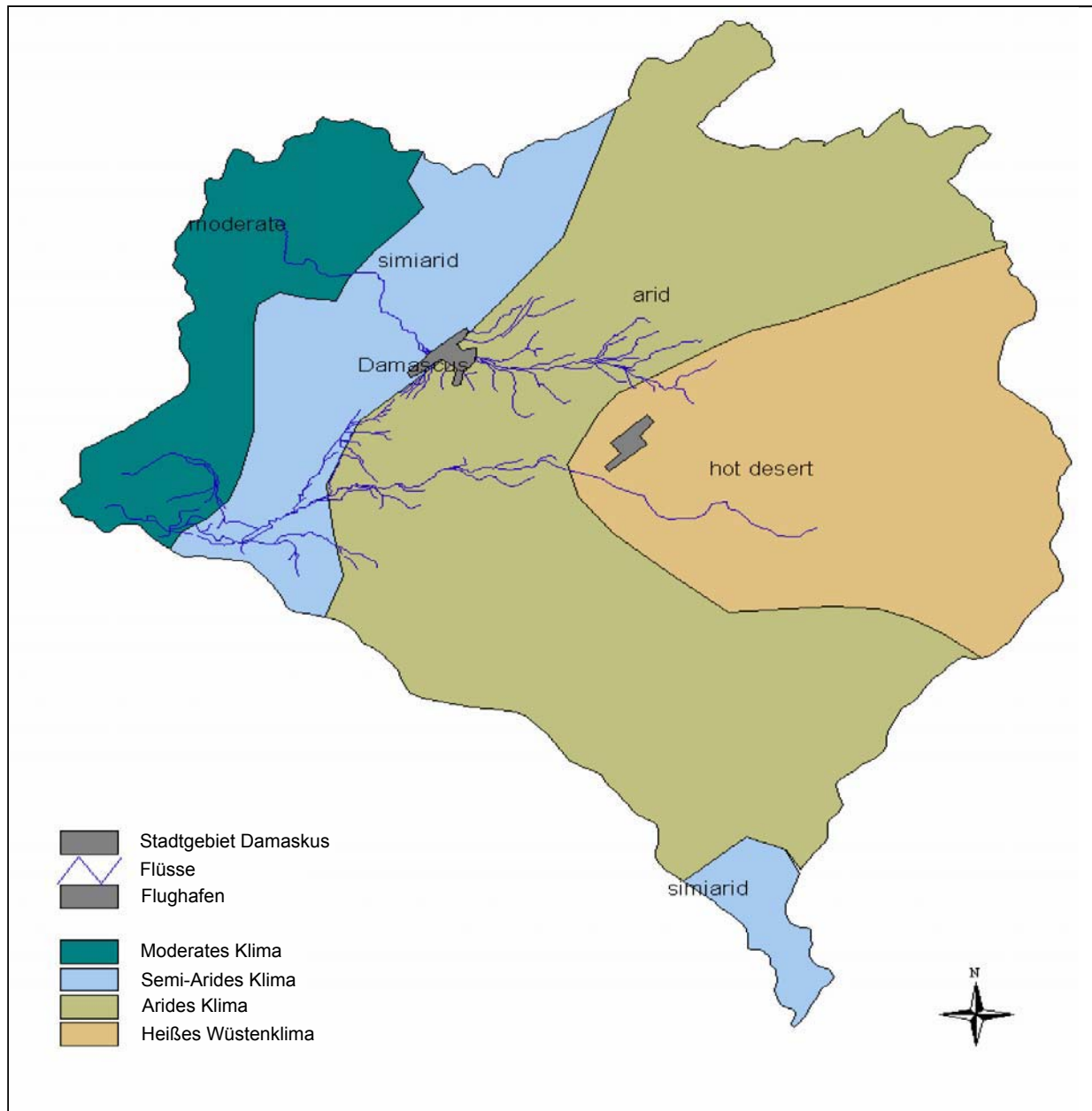


Abb. 4-2 Die Klimazonen in der Projektregion. Aus [KfW (2003)]

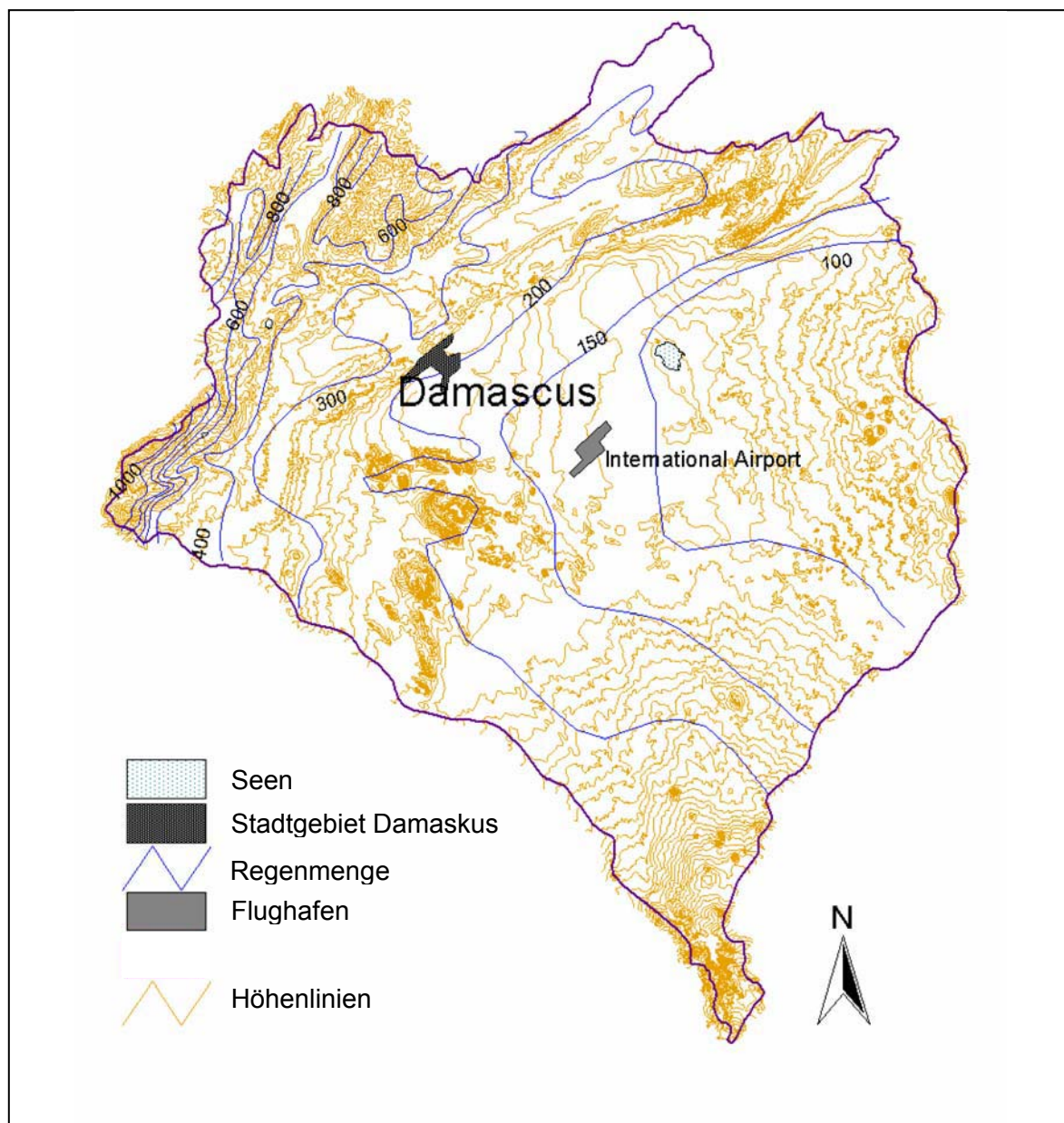


Abb. 4-3 Jährliche Regenmenge in der Projektregion in mm/Jahr. Aus [KfW (2003)]

4.2 Gegenwärtiger Stand der Wasser- und Abwasserwirtschaft in der Projektregion

Die durchgeführten Studien ergaben, dass die Versorgung der Bevölkerung mit Wasser in desolatem Zustand ist. Das gelieferte Wasser kann nicht als Trinkwasser bezeichnet werden. Der größte Teil der Bevölkerung ist gezwungen, beträchtliche Geldmittel zum Kauf von Trinkwasser aufzuwenden. Die ärmeren Schichten der Bevölkerung können die notwendigen Mittel nicht aufbringen und sind somit gezwungen, hygienisch nicht einwandfreies Wasser als Trinkwasser zu verwenden.

Ein ähnlich schlechtes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Abwasserbehandlung. Das Abwasser wird derzeit nicht durch entsprechende Anlagen behandelt und trägt somit zur Verschlechterung des Oberflächen- und Grundwassers bei. Die vielfach beobachtete Verwendung ungeklärten Abwassers zur Bewässerung stellt ein ernstes Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung dar.

4.2.1 Zustand der Wasserversorgung

Die öffentliche Wasserversorgung in der Region basiert im Wesentlichen auf der Nutzung von Grundwasser aus dafür angelegten Bohrlöchern (Brunnen). Diese sind meist nicht gegen Kontamination geschützt. Häufig verlaufen undichte Abwasserleitungen im Bereich der Brunnen. Daher weisen die meisten, wenn nicht alle, dieser Brunnen folgende Probleme bei der Wasserqualität auf:

- Zu hoher Nitratgehalt
- Hohe Wasserhärte
- Schlechter Geschmack
- Deutlich wahrnehmbarer, unangenehmer Geruch

Die schlechte Wasserqualität hat ernste Auswirkungen:

- Die Mehrheit der Bevölkerung (90%) nutzt das Wasser nicht zum Kochen und Trinken, sondern muss dieses kaufen. Ärmere Bevölkerungsschichten können sich dies nicht leisten.
- Das Wasser reagiert in aggressiver Weise mit dem Rohrsystem und den Armaturen
- Ablagerungen im Rohrsystem und Armaturen erhöhen die Abnutzung und bieten Nährboden für Bakterienwachstum
- Das Wasser ist für industrielle Zwecke nicht geeignet

Das existierende Rohrleitungssystem ist alt und in der Kapazität ungenügend. Die Rohrleitungsnetze wurden oft unfachmännisch erweitert, in den meisten Fällen illegal. Ungenügende Wasserzufuhr wurde durch mangelhaft geplante und schlecht ausgeführte zusätzliche Bohrungen kompensiert. Dies führt zu einem weiteren Absinken des Grundwasserspiegels. Das Leitungsnetz weist in erheblichem Maße Leckstellen auf, diese führen zu Verlust von Wasser und zu Kontamination. Häufig werden Abwasserleitungen oberhalb von Wasserleitungen verlegt.

4.2.2 Zustand der Abwasserversorgung

In den Siedlungen, in denen ein Kanalisationssystem vorhanden ist, befindet sich dieses in schlechtem Zustand. Die Kapazität des Systems ist ungenügend, die Rohrdurchmesser sind zu gering, zudem sind die Rohre oft aus ungeeignetem Material und weisen viele Leckstellen auf. Betrieb und Wartung des Abwassersystems entsprechen nicht den Anforderungen. Verstopfungen sind eine häufige Folge.

Das Abwasser wird unbehandelt in Wasserläufe und Bewässerungskanäle geleitet.

Das unbehandelte Abwasser wird von Landwirten direkt zur Bewässerung genutzt, da die Flüsse meist ausgetrocknet sind und viele Quellen kein Wasser mehr liefern. Diese Praxis führt zu einer weiter ansteigenden Kontamination des Grundwassers.

5. Erfolgsparameter einer Abwasserwertung in der Landwirtschaft

Ein wesentlicher Bestandteil beim Vergleich verschiedener Verfahren der Abwasserbehandlung ist eine quantitative Bewertung des wirtschaftlichen Nutzens aus der Verwertung des behandelten Abwassers und des Klärschlammes. In diesem Kapitel werden die notwendigen Voraussetzungen, dass eine Nutzung überhaupt stattfindet, vorgestellt.

5.1 Wasserknappheit

Wasserknappheit ist einer der wesentlichen Gründe, Abwasser wiederzuwerten. Für aride und semiaride Gebiete ist die daher die Verwendung von Abwasser für die Bewässerung der Felder gängige Praxis (siehe auch Kap. 4). Einer Verwertung steht entgegen, wenn z.B. Abwässer über mehrere Kilometer zu einer zentralen Kläranlage gefördert werden und nicht mehr am Entstehungsort zur Verfügung stehen. Eine solche Konstellation ist für die betroffene Bevölkerung oftmals existenzgefährdend und führt dazu, wie die Erfahrung in Syrien zeigt, dass häufig Abwassertransportkanäle aufgebrochen werden, um Abwasser entnehmen zu können [Mohamed (2004)].

Um dies zu vermeiden, sollten bevorzugt dezentrale Abwasserentsorgungssysteme eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil des dezentralen Einsatzes ist, hohe Energieaufwendungen für das Rückpumpen von Abwässern zu vermeiden.

5.2 Fehlen von pflanzen- und bodenschädlicher Bestandteile im Abwasser

Abwasser, das zur Wiederverwendung in der Landwirtschaft eingesetzt werden soll muß hygienisch unbedenklich sein. Hygienisch unbedenklich für die Personen, die mit dem Abwasser in Berührung kommen können (z.B. Landwirte) und in Bezug auf die Pflanzen, die durch Keime etc. kontaminiert werden könnten. Somit lautet eine unabdingbare Forderung an alle Abwasserentsorgungssysteme, mit dem Ziel der Abwasserwertung, hygienisch einwandfreies Abwasser bzw. Abwasserteilströme zur Verfügung zu stellen.

Diesem Aspekt wird auch im syrischen Standard für die Nutzung von geklärtem Abwasser (SASMO 2752/2002) Rechnung getragen. In der nachfolgenden Tabelle werden die Grenzwerte u.a. für die Anzahl pathogener Keime vorgestellt und mit den Grenzwerten der Länder Jordanien und Marokko verglichen [KfW (2006)]. Bei näherem Hinsehen jedoch wird offensichtlich, dass die Forderungen für die Klasse B hinsichtlich der Hygienevorgaben inkonsequent sind (siehe Tab. 5-1). Eine besondere Begründung für diese Vorgabe ist in der Richtlinie nicht hinterlegt und widerspricht auch den Vorgaben der WHO (Tab. 5-2).

Tab. 5-1 Auszug der syrischen Richtlinie für geklärtes Abwasser (SASMO 2752/2002) in mg/l im Vergleich mit anderen Ländern [KfW (2006)]

Parameter	Syria			Jordan					Morocco	
	Irrigation			Irrigation			Surface water & wadis	Aquifer recharge	Irrigation	
	A	B	C	A	B	C				
Coliforms ⁽¹⁾	<1,000	<100,000	<10,000	100	1,000	-	1,000	<2.2	5,000/100 ml	
Helminth ova (in 1 litre)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	Absence	< 1

Note: Irrigation class (For both Syria and Jordan):

Class A: Cooked vegetables; parks, playgrounds, road sides in urban areas; sports fields

Class B: Cultivated trees; road sides outside urban areas; green areas; cereals and fodder

Class C: Industrial crops; forest areas

(1) Faecal coliforms in Syrian and Moroccan standards; E. coli in Jordanian standard

(2) For sprinkler irrigation, for surface irrigation: SAR=9

Weiterhin widerspricht die Richtlinie der landwirtschaftlichen Praxis einer Mehrfelderwirtschaft, die einen Wechsel in der Fruchtfolge oftmals vorsieht. Ein Wechsel der Fruchtfolge kann einen Wechsel in eine Kategorie mit geringeren Grenzwerten zur Folge haben und somit eine Kontamination über den für diese Kategorie zulässigen Wert.

Tab 5-2: Empfohlene mikrobiologische Qualitätsrichtlinien zur Nutzung von Abwasser in der Landwirtschaft (WHO 1989)

Category Reuse conditions	Exposed Group	Intestinal nematodes ² (arithmetic mean no. of eggs per litre ³)	Faecal coliforms (geometric mean no. per 100 ml ³)	Wastewater treatment expected to achieve the required microbiological quality
Irrigation of crops likely to be eaten uncooked, sports fields, public parks ⁴	Workers Consumers Public	≤ 1	≤ 1000 ⁴	A series of stabilization ponds designed to achieve the microbiological quality indicated, or equivalent treatment
Irrigation of cereal crops, industrial crops, fodder crops, pasture and trees ⁵	Workers	≤ 1	No standard recommended	Retention in stabilization ponds for 8-10 days or equivalent for helminth and faecal coliform removal
Localized irrigation of crops in category B if exposure of workers and the public does not occur	None	Not applicable	Not applicable	Pre-treatment as required by the irrigation technology, but not less than primary sedimentation

⁽¹⁾ In specific cases, local epidemiological, socio-cultural and environmental factors should be taken into account, and the guidelines modified accordingly.

⁽²⁾ *Ascaris* and *Trichuris* species and hookworms.

⁽³⁾ During the irrigation period.

⁽⁴⁾ A more stringent guideline (< 200 faecal coliforms per 100 ml) is appropriate for public lawns, such as hotel lawns, with which the public may come into direct contact.

⁽⁵⁾ In the case of fruit trees, irrigation should cease two weeks before fruit is picked, and no fruit should be picked off the ground. Sprinkler irrigation should not be used.

Eine weitere strenge Auflage der syrischen Richtlinie wird erkennbar in Bezug auf dem Verbot der Ausbringung von gereinigtem Abwasser auf Früchte und Gemüse, welches nicht gekocht wird. Dieses Vorgehen wird in den Auflagen der WHO (1989) hingegen durchaus erlaubt. Eine gewinnbringende Abwasserwertung für den Landwirt würde durch die syrische Richtlinie erschwert [KfW (2006)].

Für die Wiederverwertung von Klärschlamm ist in Syrien die Richtlinie SASMO 2665/2002 verbindlich. Gemäß den Studien [Arabtech, KfW (2006)] entspricht die Vorgabe weitgehend internationalem Standard. Folgende Grenzwerte bezüglich pathogener Keime und Wurmeier werden gefordert, um eine eingeschränkte Wiederverwendung zu erlauben.

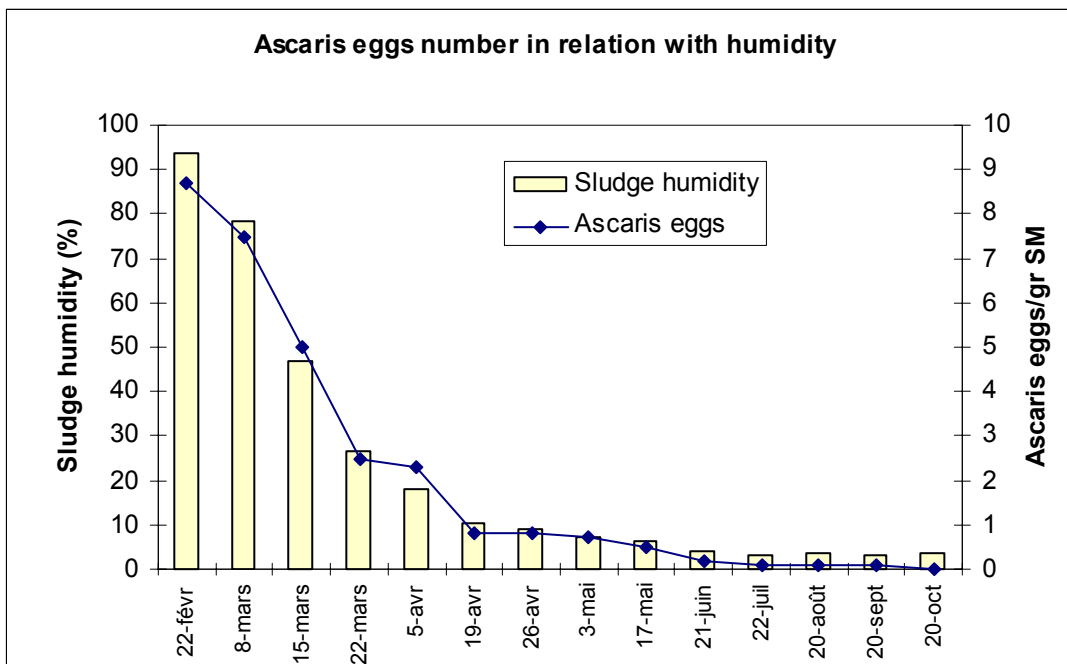
Tab. 5-3 Hygiene-Vorgaben für Klärschlamm SASMO 2665/2002 [KfW (2006)]

Faecal coliform	< 1.000 MPN per g ds
Salmonella	< 3 MPN per 4 g ds
Ascaris ova	< 1 viable per 5 g ds

Dieser Standard verbietet, unabhängig davon welcher Behandlung der Schlamm unterzogen worden ist, die Ausbringung auf Feldern mit Gemüseanbau oder Früchten, welche üblicherweise roh verzehrt werden. Nur technisch sehr anspruchsvolle Verfahren sind in der Lage die o.g. Hygienevorgaben zu erfüllen. Eine Wiederverwendung des Klärschlammes in der Landwirtschaft würde somit hohe Kosten nach sich ziehen.

Schlammkompostierung und die Trocknung des Schlammes in Trockenbetten wird in der syrischen Richtlinie nicht erwähnt. Aber gerade dieses Verfahren bietet sich aufgrund der hohen Wirtschaftlichkeit und der Zuverlässigkeit der Keimabtötung in Syrien an. Die nachfolgende Abbildung von Xanthoulis (1996) zeigt, wie effektiv die Keime innerhalb eines Zeitraumes von 8 Monaten abgetötet werden.

Abb. 5-1: Relation zwischen Feuchtigkeitsgehalt von Klärschlamm und Anzahl von Wurmeiern [Xanthoulis (1996)]



FAZIT: Die strengen und in der Konsequenz nicht immer nachvollziehbaren Gesetzaufgaben insbesondere bei der Hygiene und den Nährstoffgrenzwerten, kann eine wirtschaftliche Abwasserwertung unnötig erschweren. Den Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] folgend sind die o.g. Auflagen zurzeit ohnehin ohne praktische Relevanz, da sie von den Landwirten kaum eingehalten werden und auch zum Teil die technischen Möglichkeiten der Kontrolle fehlen. Einfache Techniken, um die in Fäkalien oder Klärschlamm enthaltenen Keime wirkungsvoll abzutöten werden nicht genannt. Hier ist der Gesetzgeber (Landwirtschaftsministerium) gefordert nachzubessern. Die bestehenden Regelwerke sollten dahingehend überprüft werden, ecosan-konforme Stoffkreisläufe zu ermöglichen.

Hinsichtlich der verschiedenen Abwassersysteme lässt sich sagen, dass die Hygienevorgaben i.d.R. von konventionellen Kläranlagen nicht ohne weitere Maßnahmen erfüllt werden. Konventionelle Kläranlagentechnik muss eine Desinfektionsstufe für die Abtötung von Keimen vorsehen. Bei Pflanzenkläranlagen hingegen ist keine nachgeschaltete Desinfektionsstufe erforderlich. Sanitärkonzepte, die auf Teilstrombehandlung abzielen, müssen hinsichtlich des Urins und der Fäkalien bestimmte Lagerungszeiten einhalten, um das Hygienekriterium zu erfüllen.

Eine weitere Forderung ist, dass Abwässer nur geringe Mengen an schwer abbaubaren organischen Verbindungen enthalten sollen. Auch sollen im Abwasser oder im Klärschlamm keine Schwermetalle enthalten sein, die sich im Boden ansammeln und so in die Nahrungskette gelangen können. Häusliches Abwasser erfüllt meist diese Forderungen. Der wirksamste Schutz einer kommunalen Kläranlage vor organisch schwer abbaubaren Verbindungen und hoher Schwermetallbelastung ist damit die getrennte Behandlung von Industrieabwässern. D.h. Industrieabwässer sollten, wenn vermeidbar, nicht einer kommunalen Kläranlage zugeführt werden. In der nachfolgenden Tabelle werden die Grenzwerte für BSB etc. im Vergleich mit anderen Ländern dargestellt.

Tab. 5-4: Auszug der syrischen Richtlinie für geklärtes Abwasser (SASMO 2752/2002) in mg/l im Vergleich mit anderen Ländern [KfW (2006)]

Parameter	Syria			Jordan					Morocco	Tunisia
	Irrigation			Irrigation			Surface water & wadis	Aquifer recharge	Irrigation	Irrigation
	A	B	C	A	B	C				
BOD ₅	30	100	150	30	200	300	60	15		30
COD	75	200	300	100	500	500	150	50		90
DO	4	-	-	>2	-	-	>1	>2		
TDS	1,500	1,500	-	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500		
TSS	50	150	150	50	150	150	60	50		30
pH	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6.5-8.5	6.5-8.5
Turbidity	-	-	-	10	-	-	-	2		
Phenol	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002		
BAS	50	50	50	100	100	100	25	25		
Cl ₂ residual	0.5	-	-	-	-	-	-	-		

Die aufgeführten Grenzwerte für BSB₅ (in der Tabelle BOD₅), CSB (COD), TSS entsprechen weitgehend auch den Forderungen der meisten EU-Länder.

FAZIT: Die o.g. Grenzwerte können von vielen Reinigungssystemen zufriedenstellend eingehalten werden. Sie sind wichtige Grenzwerte um die Umwelt zu schützen und wesentliche Parameter bei der Auslegung einer Kläranlage.

Ein möglichst hoher (nicht zu hoher um Überdüngung zu vermeiden) Nährstoffgehalt des Abwassers ist bei der landwirtschaftlichen Wiederverwertung erwünscht. Probleme können dann entstehen, wenn durch Unkenntnis der Bodenbeschaffenheit und der richtigen, pflanzengerechten Anwendungs- und Ausbringungstechnik der Düngemittel Fehler gemacht werden. Häufigster anzutreffender Fehler ist die Überdüngung. Überdüngung führt schnell zur Auswaschung von Stickstoffen in das Grundwasser und oftmals zu geringerem Ertrag (siehe auch Kap. 2.). Die vorgegebenen Grenzwerte für Nährstoffe durch die SASMO Richtlinie sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tab. 5-5: Auszug der syrischen Richtlinie für geklärtes Abwasser (SASMO 2752/2002) in mg /l im Vergleich mit anderen Ländern [KfW (2006)]

Parameter	Syria			Jordan				Morocco	
	Irrigation			Irrigation			Surface water & wadis	Aquifer recharge	Irrigation
	A	B	C	A	B	C			
N-NO ₃	20	25	25	30	45	45	45	30	50
NH ₄	3	5	-	-	-	-	-	5	
TN	-	-	-	45	70	70	70	45	
T-PO ₄	20	20	20	30	30	30	15	15	
SO ₄	300	500	500	500	500	500	300	400	250
HCO ₃	520	520	520	400	400	400	400	400	
Cl	350	350	350	400	400	400	350	350	105-350
Na	230	230	230	230	230	230	200	200	69 ⁽²⁾
Mg	60	60	60	100	100	100	60	60	
Ca	400	400	400	230	230	230	200	200	

Es fällt auf, dass in der syrischen Richtlinie die Stickstoff-Grenzwerte zur Nutzung für Bewässerungszwecke sehr niedrig sind, sie entsprechen den Werten welche in anderen Ländern für die Ausbringung in Fließgewässer gelten.

Eine Begründung der niedrigen Grenzwerte für Nährstoffe ist, dass diese der Vermeidung von Überdüngung dienen. Dieser Ansatz kann durchaus in Frage gestellt werden, da Überdüngung auch durch andere Maßnahmen vermieden werden kann. Hier ist insbesondere eine Schulung der Landwirte zu nennen.

Es wurde nachgewiesen, dass die steigenden Kosten für die Abwasserentsorgung in direktem Zusammenhang mit den erhöhten Anforderungen an die Abwasserreinigung zu setzen sind. [IWAG, (2001)]. Es stellt sich die Frage, ob in Anbetracht der knappen zur Verfügung stehenden Geldmittel in Syrien die Vorgaben der Richtlinien umsetzbar sind.

5.3 Vorhandensein von geeigneten Flächen

Abwasserwertung ist nur sinnvoll, wenn auch geeignete, landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Verfügung stehen. Dies kann für das Projektgebiet, wie die nachfolgende Tabelle zeigt, angenommen werden.

Tab. 5-6: Landwirtschaftlich genutzte Fläche in Rural Damascus Governorate [Statistical Abstract 2004 (Central Bureau of Statistics)]

Land Use	Area		
	ha	% categories	% total area
Uncultivable:			
Sandy, rocky land	147,000	66.5	
Marshes, lakes	3,000	1.4	
Roads, buildings	71,000	32.1	
<i>Total</i>	<i>221,000</i>	<i>100</i>	<i>12.3</i>
Cultivable:			
Uncultivated	64,000	31.4	
Fallow	18,000	8.8	
Cropped	122,000	59.8	
- Non-irrigated	(55,000)	(45)	
- Irrigated *	(67,000)	(55)	
<i>Total</i>	<i>204,000</i>	<i>100</i>	<i>11.3</i>
Forests	55,000		3.1
Steppe and pasture	1,322,000		73.3
Total area	1,802,000		100

5.4 Akzeptanz in der Bevölkerung

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass für die Bevölkerung, welche in der Nähe landwirtschaftlich genutzter Fläche wohnt, keine Geruchsbelästigung entsteht. Die soziale Akzeptanz einer Abwasserwertung wird stark gemindert, wenn diesem Punkt nicht ausreichend Beachtung geschenkt wird. Dies ist insbesondere in islamisch geprägten Ländern wie Syrien nicht zu unterschätzen, in denen der Umgang mit Fäkalien als „unrein“ gilt.

FAZIT: Die Abwasserentsorgungssysteme selbst sollten möglichst keine Geruchsbelästigung hervorrufen und die Ausbringung der gereinigten Abwässer oder Abwasserteilströme sollte geruchsneutral erfolgen.

5.5 Nutzensvorteil für die Landwirtschaft

Nachfolgend sind in Tabelle 5-7 wichtige Nutzenparameter für den Landwirt mit einer kurzen Erläuterung dargestellt.

Parameter	Erläuterung	Folgerung / Maßnahme
Verfügbarkeit des Abwassers	Räumliche Nähe zu den Feldern sollte gegeben sein Eine geschlossene Förderung hat den Vorteil, dass Evaporation eingeschränkt wird und möglichst viel des Abwassers auch dort ankommt wo es gebraucht wird.	Dezentrale Verfahren
Zuverlässigkeit	Das Abwasser muss dann verfügbar sein, wenn es benötigt wird. Lediglich geringe Schwankungen im zeitlichen Anfall und in der Menge sind zu tolerieren. Die Abwasserqualität sollte nicht schwanken	ggf. Speicherbecken vorsehen, Pumpsysteme
Funktionierendes Bewässerungssystem	Das Bewässerungssystem sollte ohne Störungen betrieben werden können (z.B. keine Verstopfungsgefahr durch noch im Abwasser enthaltene Schwebstoffe).	Materialtests, Umstellung des Bewässerungssystem etc.
Leichte Verarbeitung für den Landwirt	Größere Investitionen, welche lange Amortisationsdauern haben, lassen die Akzeptanz beim Landwirt rasch sinken, da der Nutzen nicht sofort erkennbar ist. Der Arbeitseinsatz sollte nicht steigen (=mehr benötigtes Personal -> höhere Kosten -> geringere Rentabilität)	Neue Techniken sind bei der Urinausbringung notwendig. (Schleppschlachtschlepper werden benötigt für eine korrekte Ausbringung).
Düngerersatz und damit die Möglichkeit Kosten zu sparen	Mohamed [2004] führt in Ihrer Arbeit auf, dass der Bau der Pflanzenkläranlage durch dieses Argument erleichtert worden ist und die Akzeptanz der Bevölkerung gesteigert hat.	Durch Teilstrombehandlung können Produkte mit hoher Nährstoffkonzentration gewonnen werden. Der erzeugte Dünger kann entweder als hochkonzentrierte Lösung oder als rieselfähiges Substrat erzeugt werden. [Otterpohl, R. 1999]
Hygienische Unbedenklichkeit	Hygienische Unbedenklichkeit bei der Ausbringung, keine gesundheitliche Gefahr für den Landwirt	Abwassersysteme müssen hygienisch einwandfreies gereinigtes Abwasser liefern.
Absetzbares Produkt entsteht	Durch Verwertung des Abwassers entstehen keine Anbau-beschränkungen und damit u.U. einhergehender Nachfrageverlust. Kein verändertes (negatives) Nachfrageverhalten durch schlechtes Image der Abwasserdüngung, hohe Akzeptanz beim Abnehmer	Lieferung eines Abwassers das frei von pathogenen Keimen ist und keine pflanzen- oder bodenschädliche Substanzen enthält. Gutes Marketing vorantreiben.

5.6 Möglichkeit der Überbrückung düngefreier Perioden

Werden Abwassersysteme eingesetzt die eine Teilstrombehandlung vorsehen (z.B. Trockentoilette mit Urinseparation) kann dieser Erfolgsparameter i.d.R. gut erfüllt werden. Bei der Trockentoilette zum Beispiel werden die Fäkalien über ein Jahr gelagert und einer Nachkompostierung unterzogen. Urin wird bei diesem Konzept mehr als 6 Monate gelagert. Bei geschickter Planung und ausreichend bemessener Speicherkapazität kann die Ausbringung der Düngemittel sehr gut gesteuert werden. Düngefreie Perioden während der Vegetationsruhe (Winterzeit) können so überbrückt werden.

Für Abwassersysteme die keine Trennung der Teilströme vorsehen (z.B. Belebungsgraben, Pflanzenkläranlagen für häusliches Abwasser oder Mischwasser) wird eine Speicherung des Abwassers aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen in den seltensten Fällen sinnvoll sein. Hier sind innovative Lösungen gefragt, die eine Verwertung des Abwassers auch während der Winterzeit möglich werden lässt. Die WHO (2003) bietet als Ausweg grundsätzlich die Verdünnung von Abwasser mit Frischwasser (Regenwasser, Oberflächenwasser, Grundwasser) an, um gesetzliche Mindestwerte einhalten zu können. Eine weitere Alternative könnte die Aufzucht von Pflanzen darstellen (z.B. Aufforstung etc.), die keine ausgeprägte Vegetationsruhe in der Winterzeit aufweisen, bzw. wo diese künstlich ausgeschaltet wird (Treibhäuser etc.) [GTZ, ecosan].

FAZIT: Abwassersysteme mit Teilstrombehandlung weisen bei diesem Erfolgsparameter ganz klare Vorteile auf. Für Konventionelle Abwassersysteme, die keine Nährstoffelimination als vorrangiges Ziel haben, stellt die Abwasserverwertung in der Winterperiode eine Herausforderung dar, die gute Umsetzungskonzepte benötigt. Einige Lösungsansätze dazu wurden kurz angerissen und müssten für jeden Standort erarbeitet und geprüft werden.

6. Modellrechnungen für verschiedene Abwasserentsorgungssysteme/ Kläranlagentypen

Ein aussagekräftiger Vergleich der verschiedenen Abwasserentsorgungssysteme ist nur möglich, wenn grundlegende Bemessungsparameter und Kostendaten für alle Verfahren verbindlich vorgegeben werden. Desweiteren sind grundlegende Zielsetzungen zu bestimmen, an denen letztendlich die Effektivität eines Reinigungsverfahrens gemessen werden kann. Diese Bemessungsgrundlagen und Zielsetzungen werden in den Unterkapitel 6.1 bis 6.8 begründet und festgelegt.

Die Kapitel 7 bis 9 beschäftigen sich dann mit der Vorstellung der einzelnen Verfahren im Detail und schließen mit einer Kostenbetrachtung und Bewertung ab. Kapitel 10 führt die Ergebnisse der Kapitel 7 bis 9 zusammen und vergleicht die verschiedenen Systeme. Die analysierten Verfahren sind:

- Belebungsgraben (Extended aeration / Oxidation ditch) mit Nährstoffelimination (N)
- Pflanzenkläranlage
- Urinseparations-Dehydrationstoiletten-System

Die Auswahl der Verfahren ist nicht zufällig. Der Kläranlagentyp „Belebungsgraben konnte sich in den Machbarkeits-Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] gegen andere traditionellen Systeme durchsetzen. Die „Pflanzenkläranlage“ ist erfolgreich in Syrien erprobt worden [Mohamed (2004)]. Das letztgenannte Verfahren ist bereits in einigen Ländern etabliert (Indien, China, Thailand u.a.) und könnte durchaus auch für Syrien eine interessante Alternative darstellen.

6.1 Generelle Zielsetzungen für das Gesamt-Entsorgungssystem

Im Sinne von „ecological sanitation“ (ecosan), sollen die in Urin und Fäkalien enthaltenen Nährstoffe, Spurenelemente und organischen Bestandteile weitgehend vollständig wieder in das Ökosystem zurückgeführt werden. Dafür ist es erforderlich, dass die zu betrachtenden Systeme eine Verwertung des Abwassers ermöglichen.

Die Abwassersysteme sollen eine Ressourcenschonung anstreben, in dem Sinne, dass wertvolles Trinkwasser, Rohstoffe und Energie eingespart werden kann.

6.2 Zielsetzungen für die Reinigungssysteme im Speziellen

Die Funktions- und Betriebssicherheit einer Kläranlage oder eines Abwasserentsorgungssystems gehören sicherlich zu den wichtigsten Zielvorgaben. Nur eine funktions- und betriebsichere Anlage kann die ihr gestellten Reinigungsaufgaben zuverlässig und langfristig erfüllen. Reinigungssysteme, die dieses Kriterium nicht erfüllen, sind demzufolge abzulehnen. Bei der Bemessung sämtlicher Anlagen sind diese Kriterien, vorrangig vor Kostenüberlegungen, unbedingt zu berücksichtigen.

Erwähnt werden sollte, dass es z.B. für größere Pflanzenkläranlagen (EZ > 20.000) kaum Erfahrungswerte über die Zuverlässigkeit solcher Anlagen gibt. Jedoch gibt es auf der anderen Seite auch keine Hinweise dafür, dass größere Pflanzenkläranlagen nicht funktionieren können. Diese Arbeit geht daher davon aus, dass bei ordnungsgemäßer, fachlich korrekter und sorgfältiger Ingenieurarbeit die oben aufgeführten Anlagentypen auch für größere Vorhaben eingesetzt werden können.

Es sollte durch die Reinigungssysteme keine Geruchsbelästigung verursacht werden. Hier sind die Kläranlagensysteme so auszuwählen und zu gestalten, dass eine Geruchsbelästigung ab einer Entfernung von 50 m möglichst vermieden wird.

Ein weiteres wichtiges Ziel im Sinne der kreislauforientierten Abwasserwirtschaft stellt die Wiederverwendung des gereinigten Abwassers dar bzw. im Falle der Dehydrations-Toilette die Nutzung der in den ausgeschiedenen Exkrementen (einschließlich Urin) enthaltenen Pflanzennährstoffen. Für die Wiederverwendung und Nutzung der Nährstoffe sind eindeutige Vorgaben hinsichtlich der Reinigungsleistung zu geben.

Unabhängbare Reinigungsziele sind:

- Hygienisch einwandfreies Abwasser (oder Teilströme des Abwassers) gemäß syrischem Standard für Abwasserverwertung (SASMO 2752/2002)

BSB ₅	: < 30 mg/l
Schwebstoffe	: < 20 mg/l (TSS)
Colibakterien	: < 1000 Colibakterien / 100 ml
Wurmeier	: < 1 egg / l

- Giftstoffe, Schwermetalle etc. sollen unter den Grenzwerten gemäß dem syrischen Standard für Abwasserverwertung (SASMO 2752/2002) liegen.

Ein weiteres Reinigungsziel ist:

- Die Bereitstellung von geklärtem Abwasser, das eine bestmögliche Verwertung der Nährstoffe sicherstellt und zwar:
 - a.) unter Beachtung der Grenzwerte gemäß syrischem Standard (SASMO 2752/2002), für uneingeschränkte Nutzung (Klasse A).
 - b.) unter Beachtung der Grenzwerte gemäß syrischem Standard (SASMO 2752/2002), für eingeschränkte Nutzung (Klasse B oder C).
 - c.) unter Berücksichtigung der FAO Richtlinie und WHO Richtlinie

6.3 Generelle Bemessungsparameter

Die im Arbeitsblatt ATV-DVWK A-131 (2000) vorgegebenen einwohnerspezifischen Schmutzfrachten ($g/(E \cdot d)$) dienen in der Regel als Grundlage für die Bemessung einer Kläranlage. Als „Leitwert“ wird meist der biochemische Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (BSB₅) aber auch der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) herangezogen.

Im Rahmen der Studien [KfW (2006)] und [Arabtech (2006)] wurden im Projektgebiet verschiedene Abwasserproben von ungereinigtem Abwasser entnommen, analysiert und als die einwohnerspezifischen Schmutzfrachten festgelegt (Tab. 6-1). Die Machbarkeits-Studie von ArabTech Jardaneh [Arabtech (2006)] legt allerdings einen etwas geringeren BSB₅ von 50 $g/(E \cdot d)$ fest. Generell können die Schmutzfrachten in einer mehr ländlichen Gegend deutlich niedriger ausfallen (siehe hierzu auch [Mohamed (2004)]). Zum Vergleich sind in der Tabelle 6-1 auch die Frachten gemäß ATV-Arbeitsblatt aufgeführt.

Tab. 6-1: Einwohnerspezifische Schmutzfrachten in g/(E*d)

	BSB ₅	CSB	Abfiltrierbare Stoffe (TS)	TOC	TKN	P _{ges}
SYRIEN (9, KfW-Studie)	55	100	60	(45)	10	2
DEUTSCHLAND (ATV-DVWK-A 198)	60	120	70	50	11	1,8

Als Bezugsgröße und Richtwert wurde in dieser Arbeit der BSB₅ mit 55 g/(E*d) festgelegt. Alle in den Studien verwendeten Einwohnerwerte (EW) wurden basierend auf dieser Größe neu ermittelt und bestimmt. Ausgangsbasis für die Neuberechnungen bildete stets die in den Studien [Mohamed (2004), KfW (2006)] errechnete Tagesfracht in kg/d BSB₅ für die Bemessung der Anlage. Auf diese Weise wurde auch z.B. der industrielle BSB₅ Anteil miterfasst und findet sich in der EW-Angabe wieder. Auf die Bezeichnung EW_{BSB5-55} für die neu berechneten Einwohnerwerte wird in dieser Arbeit allerdings verzichtet.

Als realistische, einwohnerspezifische Schmutzwassermenge wurde ein Wert von 88 l/(E*d) bestimmt [KfW (2006)]. Daraus ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 6-2 errechneten Abwasserkonzentrationen.

Tab. 6-2: Abwasserkonzentrationen in mg/l bei einem pro Einwohner bezogenen Wasserbedarf von 88 l/(E*d) (Syrien)

	BSB ₅	CSB	Abfiltrierbare Stoffe (TS)	TOC	TKN	P _{ges}
SYRIEN	625	1136	681	511	114	23

6.4 Aufbereitung der Kostendaten

Die in den Studien [Arabtech (2006), Mohamed (2004), KfW (2006)] enthaltenen Kostendaten wurden folgenden Verfahrensschritten unterworfen:

- 1.) Überprüfung der technischen Angaben auf Plausibilität und der Abgleich mit Literaturangaben und dortigen Werten. Siehe hierzu die jeweiligen Unterkapitel „Aufbau und Beschreibung der Anlage“, in der auch die grundlegenden Bemessungsparameter genannt werden.
- 2.) Durchsicht des kaufmännischen Datenmaterials (Investitionskosten und Betriebskosten) auf Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit.
- 3.) Bereinigung der Kostendaten von außerordentlichen, sehr projektspezifischen Aufwendungen, die als „Ausreißer“ betrachtet werden können und sich nicht ohne weiteres auf andere Projekte übertragen lassen. Eine Aufnahme dieser Kosten in der veranschlagten Höhe würde das Gesamtbild verzerren, den Informationswert herabstufen und damit den angestrebten Modellcharakter dieser Arbeit stören.
- 4.) Zuordnung oder Neuordnung der verschiedenen Kosten zu den einzelnen Behandlungsstufen bzw. Gewerken gemäß der Aufstellung „Behandlungsstufen inkl. Anlagenteile“ unter dem Unterkapitel „Aufbau und Beschreibung der Anlage“.

Sofern möglich wurden die Kosten nochmals unterteilt in Kosten der Bautechnik und Kosten der Maschinen-/Elektrotechnik.

Kosten die nicht einer bestimmten Behandlungsstufe zugeordnet werden konnten, wurden über einen Verteilungsschlüssel umgerechnet. Den Nebenkosten wurden zugeschrieben: Planungs- und Ingenieurleistungen sowie die aufgeführten Grundstückskosten. Sicherheitszuschläge für Unwägbarkeiten wurden als eigener Kostenblock angeführt.

5.) Die angegebenen Kosten sind aus dem Jahre 2006 und beinhalten keine Mehrwertsteuer, Import- bzw. Zollgebühren sind jedoch enthalten. Sofern die Daten nicht aus dem Jahr 2006 stammten, wurde eine Abschätzung auf Basis der Inflationsraten (z.B. bei Preisangaben in syrischen Pfund aus früheren Jahren) auf das Jahr 2006 vorgenommen. Deutsche Preisindizes wurden für die Umrechnung als nicht relevant angesehen, aber dennoch als zusätzliche Informationsquelle genutzt (z.B. Preisindizes für Bauwerke in Bayern im August 2006). Für eine Währungsumrechnung wird folgender Kurs angesetzt: **1 EUR = 63 SYP** (syrische Pfund).

6.) Wie bereits unter 6.2 „Grundlegende Bemessungsparameter“ aufgeführt, wurde als einheitliche Bezugsgröße für die Ermittlung des Einwohnerwertes die spezifische BSB₅ Fracht von 55 g/(E*d) herangezogen. Studien denen ein anderer spezifischer BSB₅ Wert zugrunde lag, wurden hinsichtlich des Einwohnerwertes neu bemessen.

Dieser Schritt war notwendig, um die Vergleichbarkeit verschiedener Verfahren und Studien zu gewährleisten (siehe auch Kapitel „Wirtschaftlichkeitsberechnungen“).

7.) Das Ergebnis der Bearbeitungsschritte 2 bis 6 wird nach kurzer Einleitung in Form einer Tabelle zahlenmäßig präsentiert, einem Vergleich mit Daten aus der Literatur unterzogen und kritisch diskutiert. Es folgt eine qualitative Beurteilung der Kosten sowie eine Abschätzung derselben für andere Ausbaugrößen (Siehe Kostenbetrachtung).

8.) In diesem Kapitel wird auch die finanzmathematische Aufbreitung der Kosten nach den „Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [LAWA (1998)] durchgeführt. Wesentlicher Zweck ist die Zusammenführung der Investitions- und Betriebskosten über die gesamte Nutzungsdauer hinweg. Als Ergebnis werden die Kostenbarwerte und die Jahreskosten für verschiedene Ausbaugrößen ausgewiesen und als Kennlinie ersichtlich gemacht.

6.5 Investitionskosten

Investitionskosten werden oft auch als Anschaffungs- oder Herstellungskosten bezeichnet. Sie werden in der Regel einmalig aufgewendet, um z.B. eine Anlage oder Maschine zu erwerben oder zu erstellen. Es sollte sich um kein geringwertiges Wirtschaftsgut handeln (Betriebskosten) und die Nutzungsdauer einer solchen Anlage sollte über fünf Jahren liegen.

Reinvestitionskosten können für Anlagenteile auftreten, deren wirtschaftliche Nutzungsdauer geringer ist als diejenige des Hauptanlagenteils (z.B.: der maschinelle Teil einer Kläranlage). Reinvestitionen, deren Nutzungsdauer unter 5 Jahren liegt, werden den Betriebskosten (Unterhaltungskosten) zugeteilt. In dieser Arbeit wird auch die Ersatz- oder Neuinvestition einer kompletten Anlage als Reinvestition bezeichnet, sofern die wirtschaftliche Nutzungsdauer der Anlage geringer als der Untersuchungszeitraum ist.

6.5.1 Verrechnung von Investitionen

- Konventionelle Kläranlagentechnik erhält einen Zuschlag von 30 % für Planung, Beratung und Internationale Vertragspartner. Zusätzlich werden den Kosten 15 % für Unwägbarkeiten zugeschlagen.
- Alternative Abwasserentsorgungssysteme / Klärsysteme (z.B. Pflanzenkläranlage, Dehydrationstoiletten) kommen aufgrund der erheblich geringeren technischen Komplexität mit geringerer ausländischer Hilfe und Gütern aus. Der Zuschlag für Planung, Beratung und internationale Vertragspartner beträgt deshalb nur 15 %. Zusätzlich werden weitere 15 % für Unwägbarkeiten verrechnet.

6.5.2 Verrechnung von Reinvestitionen

- Reinvestitionen erfordern i.d.R. weniger Planungsarbeit und Beratung. Sie werden deshalb für konventionelle Kläranlagentechnik mit 10 % beaufschlagt und für alternative Klärsysteme (z.B. Pflanzenkläranlage, Dehydrationstoiletten) mit 5 %.
- Ein Zuschlag von 15 % für Unwägbarkeiten ist zu verrechnen.

6.5.3 Nutzungsdauer

Die Nutzungsdauer ist der Zeitraum in der ein Anlagenteil noch imstande ist, eine vorgesehene Leistung zu erbringen. Oftmals trifft man auch auf den Begriff Lebensdauer oder Abschreibungszeit. Die nachfolgende Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über übliche Nutzungsdauer für abwassertechnische Anlagen.

Tab. 6-3: Auszug aus den Empfehlungen für Abschreibungszeiten nach [LAWA (1998)]

Art der Anlagen (Abwassertechnische Anlagen)	Durchschnittliche Nutzungsdauer in Jahren
Abwasserbehandlung (Kläranlagen)	
Bauwerke von Großanlagen in aufgelöster Bauweise (Rechenbauwerk, Sandfang, Vorklär-, Belebungs-, Nachklärbecken, Pumpenschächte, Maschinenhaus etc.) bzw. in Kompaktform	25 – 40
Maschineller Teil	
Rechenanlage	10 – 14
Absetz- Nachklärbecken	12 – 20
Belebungsanlage	10 – 20
Oxidationsgräben in Betonkonstruktion und Abwasserteiche	25
Elektrische Verteilungsanlagen	17 – 35
Schaltwarte (elektrischer Teil)	10 – 25
Mess- und Steuereinrichtungen	8 – 12
Faulräume	
baulicher Teil, Betonkonstruktion	30 – (50)
baulicher Teil, Stahlkonstruktion	15 – 25
maschineller Teil	10 – 20
Natürliche Schlammmentwässerung	30 – 40
Klärgasspeicherung und –verwertung	
Entschwefler, Gasgeräte, Rohre, Abgas- u. Abwärmesystem	(8) – 15
Gasbehälter	17 – 25
Gasmaschinenanlage	20 – 25
Pflanzenkläranlage	10 - 15
Pflanzenbeete	10 - 15

Auf Basis der LAWA-Empfehlungen und der Studien [Arabtech (2006), Mohamed (2004), KfW (2006)] werden die nachfolgend einheitlichen Nutzungsdauern für die Anlagen festgelegt:

Tab. 6-4: Einheitliche Nutzungsdauer für Kläranlagen / Abwasserentsorgungssysteme

Grundstück	100 Jahre
Bauwerk einer konv. Anlage	30 Jahre
Maschineller und elektrischer Teil	10 Jahre
Fahrzeuge, Ausrüstung	10 Jahre
Pflanzenkläranlage	15 Jahre
Pflanzenbeet	15 Jahre
Urinspeichertanks, Reservoir	30 Jahre
Trockentoiletten mit Urinseparation	30 Jahre

6.6 Betriebskosten

Betriebskosten werden auch „laufende Kosten“ genannt und sind zum Betrieb, zur Wartung, Unterhaltung und Überwachung von Anlagen erforderlich. Es handelt sich meist um regelmäßig aber auch unregelmäßig wiederkehrende Ausgaben.

Betriebskosten sind stark abhängig von der eingesetzten Technologie und der Ausbaugröße einer Kläranlage. Grünebaum und Schoenenberg (1994) zeigten, dass z.B. eine Kläranlage bei einer Ausbaugröße von 100.000 EW ca. 1/3 weniger Betriebskosten aufweist, ausgedrückt in $\text{€}/(\text{EW} \cdot \text{a})$, als bei einer Ausbaugröße von 10.000 EW.

In dieser Arbeit sollen folgende Kostenarten als Betriebskosten Berücksichtigung finden:

- Energiekosten
- Instandhaltungskosten
- Personalkosten
- Sonstige betriebliche Kosten

Reststoffkosten, Material- oder Stoffkosten, sowie Abwasserabgaben sind weitere Betriebskosten, die in Deutschland Anwendung finden.

Die Kosten der Reststoffentsorgung oder -verwertung sind letztendlich davon abhängig wie die Reststoffe weiterverwendet werden sollen. Demzufolge werden sie in dieser Arbeit nicht der Reinigung, sondern dem der Reinigung nachgelagerten Bereich, der Abwasser-
verwertung, zugeordnet.

Material- oder Stoffkosten (Chemikalien) werden nicht berücksichtigt, da keine Fällmittel zur chemisch-physikalischen Phosphatelimination in den Planungen vorgesehen sind. Fällmittelkosten können je nach Produkt zwischen 0,90 bis 3,50 $\text{€}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ liegen [Preis (2000), Wolz (2001)].

Die Betriebskosten werden in den Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] sehr unterschiedlich angesetzt. Z.B. unterscheiden sich bei fast gleicher Anlagengröße und Reinigungsverfahren die Ansätze für den Personalbedarf um ca. 100 %. Ähnlich verhält es sich bei den Instandhaltungskosten und den sonstigen betrieblichen Kosten. Um bessere Abschätzungen vornehmen zu können, wird entsprechend Literatur zu Rate gezogen. (s.u.)

6.6.1 Energiekosten

Der Energiebedarf einer Belebungsanlage hat mit über 70 % den größten Anteil an den Energiekosten. Für Sandfang, Faulung und Nachklärung werden jeweils um die 6 bis 8 % Energiekosten angesetzt. Der Rest verteilt sich auf Eindicker, Rechen und ggf. Vorklärung. Die nachfolgende Tabelle 6-5 gibt für verschiedene Verfahrensstufen typische Verbrauchskennzahlen wieder. Anhand dieser Zahlen konnten die Studien hinsichtlich der Energieverbrauchsabschätzungen grob überprüft und abgeglichen werden.

Tab. 6-5: Verbrauchskennwerte für den Energiebedarf [Wolz (2001)]

Verfahrensstufe	Verbrauchskennwerte in kWh / (EW*a) (Richtwerte)
Rechen-, Siebanlage	0,3 - 0,5
Belüfteter Sandfang	1,7 - 2,2
Vorklärung	0,4 - 0,6
Belebung (N, vorgeschaltete Denitrifikation)	17,2 - 25,8
Nachklärung	1,2 - 2,3
Durchlaufeindicker	0,7 - 1,1
Eindickzentrifuge	2,2 - 2,8
Anaerobe Schlammfäulung	2,4 - 2,9
Konditionierung, Entwässerung	0,8 - 1,2

Den Berechnungen wird ein Strompreis von 0,04167 €/kWh zugrunde gelegt [Arabtech (2006)].

Es ist absehbar, dass sich die Energiekosten weiterhin überproportional erhöhen werden. In dieser Arbeit wird daher mit einer realen Preissteigerung von 2 % gerechnet (siehe auch Kap. 6.7.2 Zinssätze).

6.6.2 Instandhaltungskosten

Betriebssicherheit und Prozessstabilität bedingen neben der Betriebsüberwachung und den konstruktiven Überlegungen eine gute Instandhaltung der klärtechnischen Bauwerke und Geräte. Unter Instandhaltungsarbeiten werden in der Regel Inspektion, Wartung und Instandsetzung verstanden, die durch externes oder internes Personal erledigt werden können. Kosten der letzteren Personengruppe wurden den Personalkosten zugeschlagen. Somit beinhalten die Instandhaltungskosten die Leistungen durch Dritte und die Materialkosten für Wartungs- bzw. Ersatzteile.

Die jährlichen Kostenansätze [KfW (2006)] für die Instandhaltung betragen:

- 0,5 % der bautechnischen Investitionskosten und
- 5 % der maschinen-/elektrotechnischen Investitionskosten (inkl. Fahrzeuge etc.)

6.6.3 Personalkosten

In erster Linie handelt es sich bei diesen Kosten um die Löhne und Gehälter der Arbeiter und Angestellten des Betriebspersonals der Kläranlage. Hinsichtlich der Höhe der Gehälter wurde zwischen den Studien [Arabtech (2006); KfW (2006)] Mittelwerte gebildet, die auch die zukünftige syrische Besoldungs-Vorgabe, von 10 % realer Lohnerhöhung bis 2015, mit einschließt.

Tab. 6-6: Jährliche Gehälter und Personalbedarf werden wie folgt festgelegt:

Personalkosten	€/a
Direktor, Betriebsleiter	9000
Ingenieur	6400
Aufsichtsperson	4000
Chemiker	4000
Techniker	3500
Labortechniker	3500
Buchhalter	2610
Administration/Sekretariat	1885
Fahrer	1885
Hilfspersonal	1700

6.6.4 Sonstige betriebliche Kosten

In diesem Kostenblock befinden sich Verwaltungskosten (Telefon, Büromaterial etc.), Kosten für Fahrzeuge (außer Instandhaltung) und Reisespesen, Beiträge und übrige Aufwendungen. Die sonstigen betrieblichen Kosten werden mit 20 % der Personalkosten angesetzt.

6.7 Dynamische Kapitalwertmethode

Für die vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde das Standardverfahren „dynamische Kapitalwertmethode“ angewendet.

6.7.1 Untersuchungszeitraum

Der Untersuchungszeitraum gibt den Zeitraum an, für den man alle anfallenden Kosten (Investitionen, Laufende Kosten) bei allen Varianten ermitteln will. Zweckmäßigerweise entspricht er meist der Lebensdauer (Nutzungsdauer) der größten Kostengruppe

In dieser Arbeit wird der Untersuchungszeitraum auf 30 Jahre nach und 4 Jahre vor dem Bezugszeitpunkt (Inbetriebnahmestart) festgelegt. Dabei sind die 30 Jahre die vorgesehene Nutzungsdauer und die 4 Jahre die Dauer der Projektierungs- und Bauphase.

Die Investitionen vor dem Bezugszeitpunkt werden prozentual wie folgt verteilt:

- -3. Jahr 100 % Grundstück
- -2. Jahr 40 % Bautechnik
- -1. Jahr 30 % Bautechnik, 50 % maschineller und elektrischer Anteil
- 0. Jahr 30 % Bautechnik, 50 % maschineller und elektrischer Anteil,
100 % Ausrüstung

Für die Trockentoiletten mit Urinseparation wird eine Vorlaufzeit von 3 Jahren in Ansatz gebracht.

6.7.2 Zinssätze

Der Zinssatz i wurde mit 3 % angesetzt ($i = 0,03$). Dieser Zinssatz wird in Deutschland als Standardwert für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen technischer Infrastrukturmaßnahmen angesetzt [Schmidtke (2001)] und soll auch in dieser Arbeit verwendet werden.

Eine reale Preissteigerung (r) bei elektr. Energie von 2 % ist ab dem Bezugszeitpunkt berücksichtigt worden.

6.7.3 Verwendete Formeln für die Berechnung der Jahreskosten bzw. der Projektbarwerte

i = Zinssatz, absolut (nicht in Prozent) ; $q = 1 + i$ (Zinsfaktor)
 r = Preissteigerungsrate, absolut ; $s = 1 + r$ (Preissteigerungsfaktor)

Akkumulationsfaktor für einmalige Kosten (AFAKE) = q^n

Diskontierungsfaktor für einmalige Kosten (DFAKE) = $1 / q^n$

Kapitalwiedergewinnungsfaktor (KFAKR) = $((q - 1) * q^n) / (q^n - 1)$

Akkumulationsfaktor für gleichförmige Kostenreihen (AFAKR) = $(q^n - 1) / (q - 1)$

Diskontierungsfaktor für gleichförmige Kostenreihen (DFAKR) = $(q^n - 1) / ((q - 1) * q^n)$

Diskontierungsfaktor für progressiv steigende Kostenreihen (DFAKRP) = $(s / q)^n$

6.8 Nutzenparameter der Abwasserverwertung

6.8.1 Mineraldünger-Ersatz und Nährstoffrecycling

Gereinigtes Abwasser oder Teilströme des Abwassers (z.B. Urin) sowie Klärschlamm enthalten Nährstoffe, die Mineraldünger bis zu einem gewissen Grad substituieren können. Der Preis der Mineraldünger gibt den monetären Wert dieser Nährstoffe wieder. Durch eine entsprechende Umrechnung kann so der entsprechende Geldwert für einen m^3 Urin oder Abwasser ermittelt werden. Je nach Wirkungsgrad des Abwasserentsorgungssystems hinsichtlich der Abwasserverwertung kann dadurch ein höherer oder niedrigerer geldwerter Nutzen entstehen.

Eine Gesamtbetrachtung des Nutzens unter Einbezug erzielbarer Deckungsbeiträge für den Verkauf landwirtschaftlicher Produkte, des besten Produktmixes unter Berücksichtigung gesetzlicher Anbaubeschränkungen, des optimalen Einsatzes der verschiedensten Dünger usw. würde den Rahmen dieser Arbeit bei weitem Sprengen und wird daher nicht behandelt.

Unabhängig von dieser monetären Betrachtung können aber die Zielsetzungen hinsichtlich der Ressourcenschonung durchaus beurteilt werden.

Nach einer Abfrage von Düngemittelhändler im Projektgebiet in Syrien [GTZ, ecosan] wird in erster Linie als Mineralstoffdünger Superphosphat mit einem Anteil von 22 % P_2O_5 eingesetzt, sowie Ammoniumnitrat mit einem Anteil von 33 % N und Kaliumsulfat gran mit einem K_2O -Gehalt von 50 %. Die jeweiligen Preise sind in Tabelle 6-7 aufgelistet.

Tab. 6-7: Mineraldüngerpreise in Syrien (2006)

Dünger mit Nährstoffangabe	€/t Dünger	€/t Nährstoff
Ammonium Nitrat 33% N	191	574
Superphosphat 22 % P ₂ O ₅	143	650
Kaliumsulfat gran 50 % K ₂ O	206	412

Vergleicht man diese Preise mit der Aufstellung der Durchschnittspreise für mineralische Düngemittel in Deutschland (siehe Kap. 2.3), erkennt man, dass der syrische Preis für Stickstoff-Dünger ca. 20 % günstiger, für Phosphat und Kalium jedoch ca. 10 % bzw. 20 % teurer ist. Für die Modellbetrachtung werden die Nährstoffpreise pro Tonne aus der Tabelle 6-7 herangezogen. Damit ergeben sich unter Berücksichtigung der Urin-Nährwerte (siehe Kap. 2.4.5) Preise pro 1 m³ Urin gemäß Tabelle 6-8.

Tab. 6-8: Nährstoffgehalt und Preis in € pro 1 m³ Urin

Nährstoff	Preis / kg Reinnährstoff €/kg	Nährstoffgehalt in Urin [kg/m ³]	Preis in € pro 1 m ³ Urin
N	0,58	7,3	4,23
P	1,48	0,6	0,88
K	0,50	1,6	0,80
GESAMT €/m³			5,91

Klärschlamm wurde in 2006 für ca. 1,59 €/m³ von der Kläranlage in Damaskus verkauft [GTZ, ecosan]. Betrachtet man jedoch die Nährstoffgehalte von Klärschlamm (siehe Kap. 2.4.5) und rechnet mit obigen Nährstoffpreisen, wird der Klärschlamm unter dem errechneten Preis verkauft. Daher werden für die monetäre Bewertung des Klärschlammes sowohl der eigentliche Verkaufspreis als auch der errechnete Nährstoffpreis herangezogen und ausgewiesen. In den nachfolgenden Tabellen 6-9 und 6-10 ist der Nährstoffwert im Klärschlamm (KS) nochmals pro m³ und pro t dargestellt (siehe auch Kap. 2.4.6).

Tab. 6-9 Nährstoffwerte für Klärschlamm in €/m³

Nährstoff	Preis / kg Reinnährstoff €/kg	Nährstoffgehalt in KS TS [kg/m ³]	Preis in € pro 1 m ³ KS
N	0,58	19,5	11,31
P	1,48	8,6	12,73
K	0,50	1,6	0,80
GESAMT €/m³			24,84

Tab. 6-10 Nährstoffwerte für Klärschlamm in €/t

Nährstoff	Preis / kg Reinnährstoff €/kg	Nährstoffgehalt in KS TS [kg/t]	Preis in € pro 1 t KS
N	0,58	30	17,40
P	1,48	13,2	19,53
K	0,50	2,5	1,25
GESAMT €/m³			38,18

Der Wert des gereinigten Abwassers wird über den jeweiligen Nährstoffwert errechnet und wird letztendlich abhängig sein von der Reinigungsleistung des jeweiligen Abwassersystems.

Tabelle 6-11 gibt den Nährstoffwert für gereinigtes Abwasser wieder (siehe auch Kap. 2.4.4).

Tab. 6-11 Nährstoffwert für gereinigtes Abwasser

Nährstoff	Preis / kg Reinnährstoff €/kg	Nährstoffgehalt in Abwasser [kg/1000 m ³]	Preis in € pro 1000 m ³ Abwasser
N	0,58	30	17,40
P	1,48	10	14,80
K	0,50	30	15,00
Gesamt €/1000 m³			47,20

6.8.2 (Trink-) Wassereinsparung

Je nach eingesetztem Abwasserentsorgungssystem können erhebliche Mengen an Trinkwasser eingespart werden. Diese Einsparung an Trinkwasser kann, großflächig betrachtet, erhebliche Auswirkungen auf das gesamte Wassersystem haben. Es kann z.B. dazu führen, dass keine neuen Brunnen gebohrt werden müssen, dass eine Grundwasserabsenkung verhindert wird, dass Wasserversorgungsnetze kleiner ausgelegt werden können etc. und somit dramatische Kosteneinsparungen möglich sind. Diese Form der Betrachtung kann aufgrund des Umfangs einer solchen, in dieser Arbeit nicht geleistet werden.

Der in dieser Arbeit angesetzte Gegenwert entspricht dem syrischen Trinkwasserpreis von ca. 0,06 € pro m³ Trinkwasserpreis bei einer Abnahme unter 20m³. Der Trinkwasserpreis steigt dann staffelweise bis ca. 0,31 € pro m³ bei einer Abnahmemenge größer 60 m³. Da dieser Preis aber hochsubventioniert ist, bleibt die Aussagekraft hinsichtlich der tatsächlichen Einsparung gering.

6.8.3 Energieeinsparung

Die Energiekosten wurden bereits in der Kostenbetrachtung berücksichtigt. In der Bewertung wird aber vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung und des Umweltschutzes nochmals gesondert darauf eingegangen.

7. Modellrechnung 1 : Belebungsgraben (Extended aeration / Oxidation ditch) mit Nährstoffelimination (Nitrifikation/Denitrifikation)

7.1 Art und Herkunft des Datenmaterials

Zwei Studien aus dem Jahr 2006 standen zur Verfügung, aus denen die grundlegenden Kostendaten gewonnen werden konnten. Die Studien beschäftigten sich mit der kompletten Wasserver- und Entsorgung der jeweiligen Projektgebiete, beschrieben den Istzustand und leiteten auf der Basis von verschiedenen Analysen Vorschläge für neue Wasserver- und Entsorgungssysteme ab. Ein Abschnitt innerhalb der Studien beschäftigte sich auch mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von zwei Abwasserreinigungssystemen. Im Einzelnen :

Konzeptentwurf, Studie, Consulting Engineers Salzgitter; März 2006, Auftraggeber KfW [KfW (2006)]

Zwei Anlagentypen, Belebtschlammverfahren mit Faulung und Belebungsgraben, wurden detailliert gegenübergestellt und für vier Ausbaugrößen (11.000 EW, 186.000 EW, 240.000 EW und 440.000 EW) die jeweiligen Kostendaten ermittelt und gegenübergestellt. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass für das Projektgebiet eine zentrale Kläranlage zu empfehlen ist und schlägt als bestes Reinigungsverfahren den Belebungsgraben vor.

Machbarkeits-Studie, MWH Arabtech Jardaneh, März 2006, [Arabtech (2006)]

Diese Studie stellt für ihr Projektgebiet ebenfalls die o.g. Anlagentypen vor. Berechnungen wurden für die Ausbaugrößen EW 169.000 und EW 189.000, mit einer jeweiligen Zwischenausbaustufe (EW 129.000 / EW 144.000) angefertigt. Auch hier lautet die Empfehlung der Studie einen Belebungsgraben als zentrale Kläranlage zu bauen.

Die Berechnungen, sowohl in technischer als auch in kaufmännischer Hinsicht, sind innerhalb der Studien zum Teil sehr unterschiedlich und nicht immer vergleichbar. Obwohl innerhalb der einzelnen Gewerke und in Bezug auf Zuschläge für Planung und Ingenieurleistungen oder Grundstückskosten doch spürbare Differenzen auftreten, stimmen die Gesamtkosten jedoch gut überein. Als „Leitstudie“ wurde [KfW (2006)] ausgewählt, da sie die einzelnen Berechnungen besser nachvollziehbar vorstellte. Die Studie [Arabtech (2006)] nahm einen Kontrollcharakter ein und diente der Verifizierung der Daten.

7.2 Aufbau und Beschreibung der Anlage

Der Aufbau der in Syrien geplanten Belebungsgräben gestaltet sich wie in der folgenden Prinzipzeichnung dargestellt:

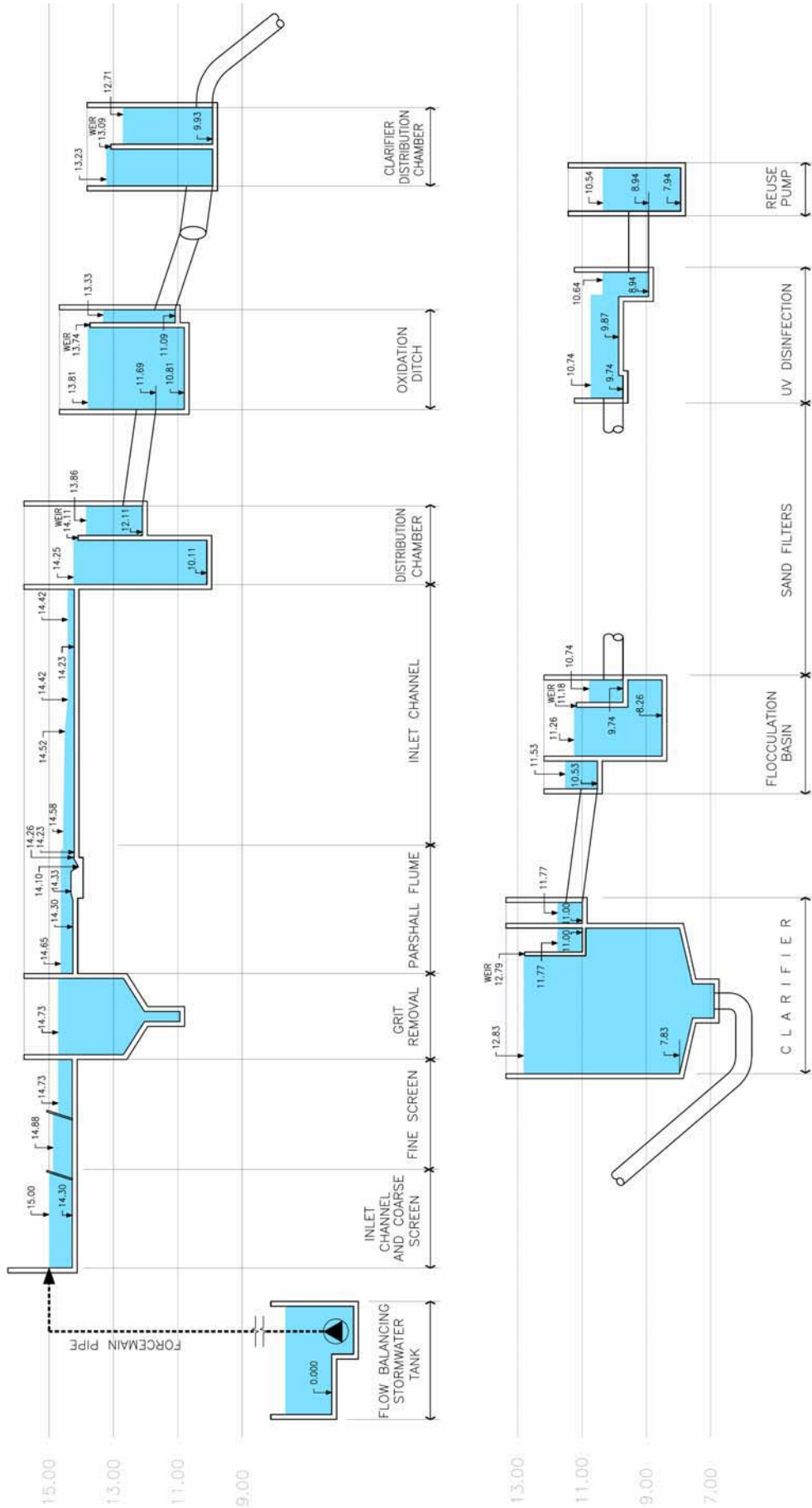
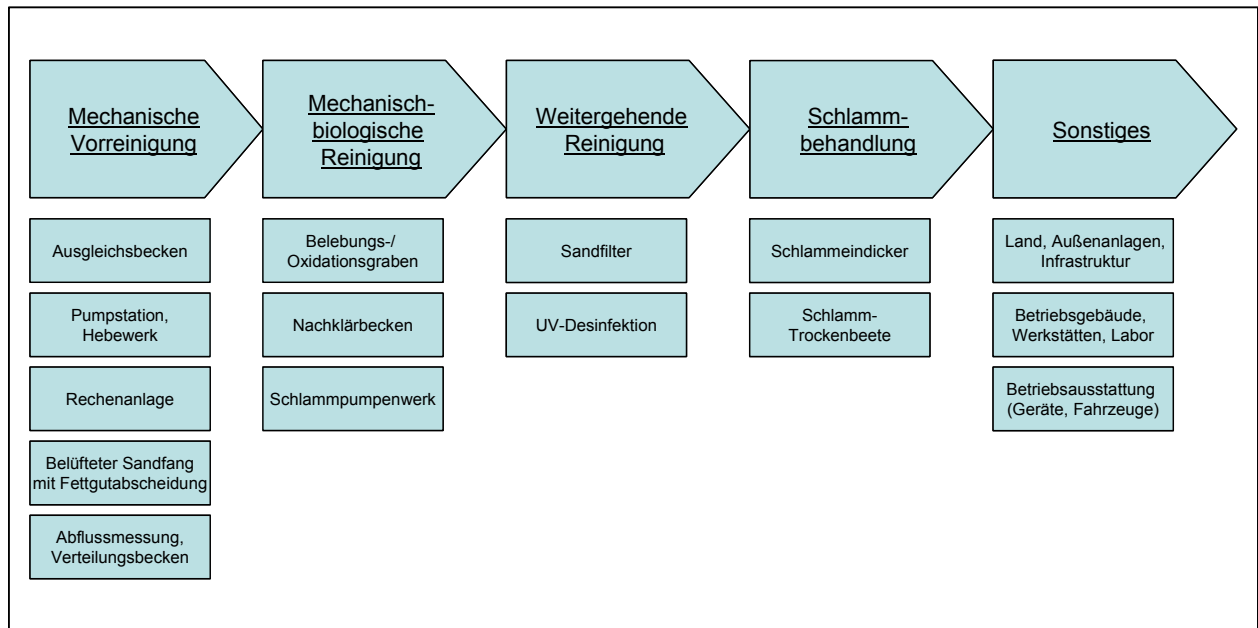


Abb. 7-1 Prinzip einer Kläranlage auf Basis des Belebungsgrabens, aus [KfW (2006)]

Abb. 7-2 Behandlungsstufen inkl. Anlagenteile



7.2.1 Mechanische Vorreinigung

Ausgleichsbecken

Das Ausgleichsbecken soll bei Regenwetter die Kläranlage vor einer Überlastung schützen und die dreifache Menge des täglichen Trockenwetterabflusses auffangen können. Wird diese Menge überschritten, wird das Abwasser ungeklärt über einen Bypass direkt abgeleitet.

Pumpstation, Hebewerk

Die Pumpstation ist mit mindestens zwei Schneckenpumpen ausgestattet, die das Abwasser bei einem Förderwinkel von 37° um ca. 5m anhebt. Die Höhe wurde so bemessen, dass das Abwasser die Kläranlage rückstaufrei durchlaufen kann. Die max. Zulaufmenge wurde mit $158 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$ angesetzt (1,8 fache Menge der kalkulierten Abwasserfracht von $88 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$). Je nach Anlagengröße schwankt die Förderleistung pro Pumpe zwischen 10 l/s und 200 l/s und der Durchmesser der Schneckenpumpen von 30 cm bis 120 cm.

Rechenanlage

Durch Rechen und Siebe werden Grobstoffe (z.B. Papier, Hygieneartikel, Kunststoffe, Textilien etc.) zurückgehalten, wobei die lichten Weiten zwischen den Rechen- bzw. Siebstäben mit 40mm und 10mm angesetzt wurden. Die Rechenreinigung erfolgt bei kleineren Anlagen manuell, bei größeren Anlagen ist eine maschinelle Reinigung vorgesehen. Die Rechenanlage ist mit einem Bypass Kanal ausgestattet, der im Notfall manuell bedient werden kann.

Tabelle 7-1 : Spezifische Rechengutmengen in Abhängigkeit der Durchgangswerten
[Kaub (2006)] – modifiziert nach [ATV-DVWK-M 369 (2003)]

Aggregat	Durchgangswerte [mm]	Spezifische Rechengutmenge [l/E*a]	
		Nicht entwässert (8 % TR)	Mechanisch entwässert (25 % TR)
Grobrechen	100 – 40	2 – 5	0,5 – 1,5
Feinrechen	30 -10	5 – 15	2,5 – 5
Grobsieb	15 – 5	11 – 17	3,5 – 5,5
Siebmaschinen	6 – 1	16 – 35	5 – 12
Feinsieb	5 – 0,5	17 - 45	5,5 - 15

In Syrien ist davon auszugehen, dass diese Richtwerte deutlich unterschritten werden, da es z.B. nicht üblich ist, Toilettenpapier über die Toilettenspülung zu entsorgen.

Belüfteter Sandfang mit Fettgutabscheidung [Londong (1987)]

Mischwasserkanalisationen bedingen auch immer den Eintrag von Sand. Zur Schonung aller mechanischen Anlagenteile (Pumpen, Räumaggregate etc.) und um unerwünschte Ablagerungen in anderen Anlagenteilen zu verhindern, ist eine Sandabscheidung vorgesehen. Hierbei wird die Fließgeschwindigkeit des Abwassers soweit herabgesetzt, dass der Sand und andere körnige Stoffe absinken können.

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen mit der Kläranlage in Damaskus, wo das Abwasser mit außerordentlich hohen Fettanteilen belastet ist, wurde der Sandfang mit einer Fettabcheidung ergänzt.

Die Trennung von Sand und Fett in einem Anlagenteil soll durch einen belüfteten Sandfang ermöglicht werden. Darüber hinaus hat der belüftete Sandfang noch die Vorteile, geruchsreduzierend zu wirken und insbesondere bei schwankenden Zuflüssen eine Einhaltung einer Fließgeschwindigkeit von $v < 0,2$ m/s zu gewährleisten. Auslegungsbasis ist eine Verweilzeit von 10 min.

Richtwerte für anfallende Sandmengen bewegen sich nach [Kainz et al. (2002)] zwischen 2 und 6 l / (E*a). Wesentlich für die anfallenden Sandmengen ist der Anteil des Regenwassers am Abwasser. Aufgrund der erheblich geringeren Regenfälle in Syrien kann somit mit einem geringeren Sandanfall gerechnet werden.

7.2.2 Mechanisch-Biologische Reinigung

Belebungsgraben / Oxidationsgraben

Im Belebungsgraben werden dem Abwasser durch die Arbeit von Mikroorganismen (z.B. Bakterien) kolloide und gelöste Stoffe entnommen und abgebaut. Entstehender Überschussschlamm wird zusammen mit dem Rohschlamm in einen nicht faulfähigen Zustand überführt. Eine getrennte Schlammstabilisierung durch Faulung ist deshalb nicht erforderlich. Der für den Abbauprozess benötigte Sauerstoff (2,5 kg O₂ / kg BSB₅) wird über Belüfter eingetragen.

Nach [Imhoff (1999)] unterscheiden sich die Auslegungsparameter der verschiedenen Belebungsverfahren wie folgt :

Prozess	Einheit	Belebtschlammverfahren (konventionell)	Belebtschlammverfahren mit Denitrifikation	Belebungsgraben (inkl. Denitrifikation und Schlammstabilisierung)
Raumbelastung B_R	g BSB ₅ / (m ³ BB*d)	1.000	500	250
Volumen	c/m ³	25	12	4
Schlammbelastung B_{TS}	g BSB ₅ /(g TS*d)	0,3	0,15	0,05
Belüftungszeit t_R	h	3,6	7,2	14,4
Schlammalter	d	4	10	25

Die von der Studie [KfW (2006)] verwendeten Bemessungsparameter waren eine Schlammbelastung B_{TS} mit 0,07 kg BSB₅ / (kg TS*d) und eine mit Raumbelastung B_R mit 0,25 kg BSB₅ / (m³ BB*d). Die Verweildauer betrug 53,6 h. Zwei Belebungsbecken wurden geplant mit einer Tiefe von 5,4 m.

Nachklärbecken

Zwei Nachklärbecken wurden geplant mit einer Tiefe von jeweils 4m. Die Verweilzeit im Nachklärbecken wurde mit 4 h angesetzt.

Schlammumpfenwerk

Bestehend aus zwei Rücklaufschlammumpfen, die den im Nachklärbecken abgesetzten Schlamm komplett ins Belebungsbecken zurückpumpen (H=4m). Und zwei Schlammumpfen, die den stabilisierten Schlamm zum Schlammeindicker befördern (H=10m).

7.2.3 Weitergehende Reinigung

Sandfilter

Sandfilter entfernen Schweb- und Trübstoffe sowie Würmer und andere größere, schädliche Organismen, die die vorhergehenden Reinigungsschritte überstanden haben. Der Einsatz der Sandfilter ist insbesondere für den nachfolgenden Desinfektionserfolg mit UV-Strahlen wichtig, da Schwebstoffe im Wasser die UV-Strahlen u.U. absorbieren können. Desweiteren können Trübstoffe eingeschlossene Krankheitserreger vor der Strahlung schützen. Das Filterbett wurde mit 0,80 m geplant. Die Filtrationsrate liegt bei 10m/h.

Ultraviolette Bestrahlung (UV)

Mit Hilfe von UV-Strahlen sollen verbliebene Krankheitserreger im Wasser abgetötet werden. Die UV-Bestrahlung wirkt auf Bakterien und Viren desaktivierend. Der spezifische Durchfluss pro Lampe wurde mit 12,5 m³/h geplant. Eine automatische Reinigung der Lampen wurde vorgesehen.

Nach den ATV-DVWK Richtlinien bewegen sich die Kosten der Desinfektion mit UV-Strahlung bei ca. 0,03 bis 0,06 EUR pro m³.

7.2.4 Schlammbehandlung

Schlammeindicker

Mit dem Eindicker soll eine Verminderung der Schlammmenge erreicht werden, indem man den Wassergehalt verringert. Eine reduzierte Schlammmenge erlaubt wiederum eine kleinere Bemessung der nachgelagerten Verfahrensschritte. Eindicker erreichen einen Restwassergehalt von ca. 85 %.

Die Menge an anfallendem Schlamm für verschiedene Belebungsverfahren stellt sich wie folgt dar:

Verfahren	g SS / g BSB5 entfernt	g SS / (E*d)
Belebtschlammverfahren (activated sludge)	0,55 – 0,65	84 – 89
Belebungsgraben (activated sludge with extended aeration)	0,12 – 0,16	30 - 40

Schlamm-trockenplätze/Trockenbeete

Der auf die Beete aufgebraachte Schlamm sollte, abhängig von der Temperatur und der Sonneneinstrahlung, bis zu 6 Monate dort verbleiben. Erst dann ist er für die Verwertung in der Landwirtschaft geeignet. Die Oberflächen-Schlammbelastung wurde mit 160 kg TS / (m²*a) kalkuliert

7.3 Aufbereitung der Kostendaten

Die im Kapitel 6.4 beschriebenen Schritte zur Aufbereitung des Datenmaterials wurden durchlaufen und folgende Anpassungen, Umverteilungen vorgenommen:

- Außerordentlich hohe Erschließungskosten in einem Projekt bzw. geplanten Kläranlagenstandort wurde auf ein mit den anderen Projekten vergleichbares Niveau gekürzt.
- Der in [Arabtech (2006)] verwendete Ansatz von Planungskosten in Höhe von 5 % wurde als zu knapp bemessen angesehen. Aufgrund der noch fehlenden Expertise in Syrien in Bezug auf Kläranlagentechnik ist sowohl mit ausländischen Beratern als auch mit ausländischen Zulieferfirmen zu rechnen. Da auch kein höherer Kostenansatz bei den einzelnen Gewerken erkennbar war, wurden die Planungskosten auf ein realistisches Minimum von 15 % angesetzt.
- Der Ansatz der Grundstückspreise pro ha unterschied sich bei den Studien um mehr als das fünffache. Trotz der unterschiedlichen Projektgebiete, ist von dieser Differenz nicht auszugehen. Beide Projektgebiete liegen im Umland von Damaskus und es gibt keinen begründeten Nachweis oder auch Hinweis in den Unterlagen, der diese Differenz erklärt. Auch hier wurde eine Anpassung vorgenommen und mit einem für alle Standorte einheitlichen Ansatz von EUR 20.635 pro ha gerechnet. In der Empfindlichkeitsbetrachtung und in der Bewertung wird auf diesen Punkt nochmals eingegangen. Die unterschiedlichen Ansätze für den Grundstücksbedarf wurden jedoch übernommen, da sich der dadurch hervorgerufene Preisunterschied in tolerierbaren Grenzen hielt.

- Die einzelnen Kosten wurden auf die in der Aufstellung (Abb. 7-2) vorgestellten Behandlungsstufen und Gewerke zugeordnet. Planungs- und Grundstückskosten wurden unter Nebenkosten zusammengefasst.
- Die Einwohnerwerte (EW) in [Arabtech (2006)] wurden an die Bezugsgröße $BSB5 = 55 \text{ g}/(E \cdot d)$ angeglichen.
- Beide Studien stammten aus dem Jahr 2006, so dass keine weitere Preisumrechnung durchgeführt werden musste.

7.4 Kostenbetrachtung

Das Ergebnis der Aufbereitung der Kostendaten findet sich in einer Gesamtdarstellung für alle analysierten Projekte im Anhang wieder. Die Darstellung im Anhang liefert die Aufschlüsselung der Kosten nach Behandlungsstufen und Gewerken inklusive der Unterteilung in maschinen-, elektro- und bautechnischen Anlagenteile. Die für die folgende Kostenbetrachtung relevanten Kostenelemente werden aus dieser Übersicht entnommen und entsprechend vorgestellt.

Für die Modellentwicklung wird insbesondere die ständige Rückkoppelung der Kostendaten aus Syrien mit vergleichenden Kostendaten aus der Literatur wichtig sein. So können wichtige Erkenntnisse in Bezug auf Verhältniswerte und Korrelationen gewonnen werden, die für eine Abschätzung der Kosten für andere Ausbaugrößen oder Einwohnerwerte bedeutend sind. Das sich aufgrund des zur Verfügung stehenden relativ geringen syrischen Datenmaterials Unschärfen ergeben können, liegt auf der Hand und wird bei den Bewertungen und Empfindlichkeitsprüfungen entsprechend berücksichtigt.

Im ersten Teil der Kostenbetrachtung werden die Investitionskosten eines Belebungsgrabens näher analysiert. Dem schließt sich im zweiten Teil eine kurze Betrachtung der Betriebskosten an. Im dritten Teil schließlich werden die beiden zuvor genannten Kostengruppen einem dynamischen Kostenvergleich unterzogen, der wiederum die Basis für die spätere Gesamtbetrachtung unter Kapitel 10 bildet.

7.4.1 Investitionskosten

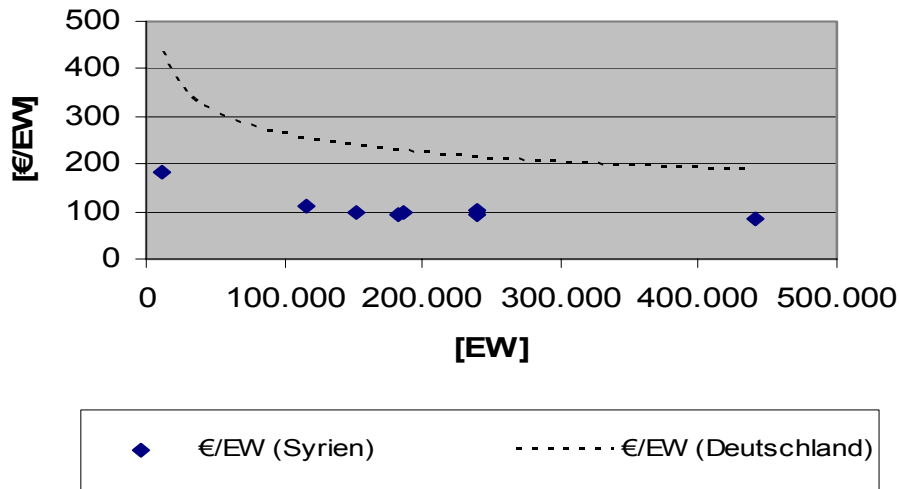
Basierend auf den Kostendaten der Studien inklusive deren oben beschriebenen Aufbereitung ergeben sich die in der Tabelle dargestellten Gesamtkosten.

Tab. 7-2 Gesamtkosten der Kläranlage „Belebungsgraben“ mit und ohne Nebenkosten (Planung, Grundstücksk.)

EW in TSD	11	116	152	181	186	239	441
ENDBETRAG I (ohne Nebenkosten) in TSD	1.548	10.980	13.008	14.635	14.013	18.886	28.166
€/EW (I)	139	94	85	81	75	79	64
ENDBETRAG II (Gesamt, inkl. Nebenb.) in TSD	2.027	12.962	15.294	17.329	18.395	22.218	36.901
€/EW (II)	182	111	100	95	99	93	84

Ein Vergleich mit deutschen Kostenrichtwerten zeigt, dass der Kostenverlauf relativ ähnlich gestaltet ist, wenn auch betragsmäßig auf einer niedrigeren Ebene. In Abbildung 7-3 wurde die von [Günthert (2001)] angegebene Formel für einen Kläranlagen-Neubau eingesetzt und den Zahlen der Tabelle 7-2 (Trendlinie aus den €/EW (II) Werten) gegenübergestellt.

Abb. 7-3 Investitionskostenverlauf – ein Vergleich



Die Formel stammt aus der Literatursauswertung der in Deutschland gebauten Kläranlagen [Günthert (2001)] und lautet

$$y = 3.885,4 * EW^{-0,2354}$$

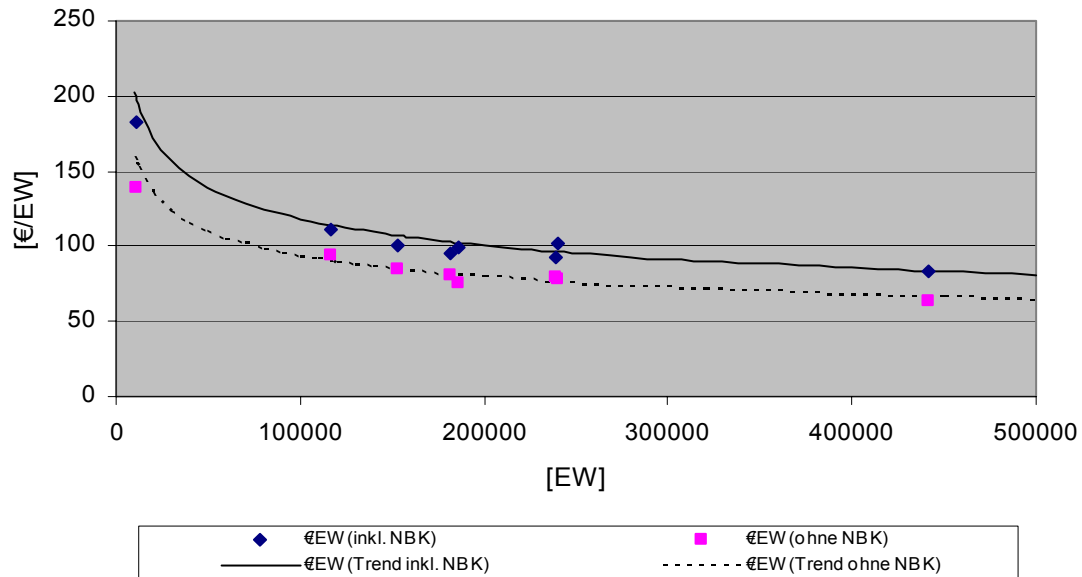
Für die o.g. Einwohnerwerte ergeben sich bei Verwendung der Formel die in Tabelle 7-3 dargestellte Zahlenreihe. Bei Gegenüberstellung der Zahlenreihe mit den Kostenwerten aus Syrien erkennt man, dass die syrischen Preise um ca. 52 – 58 % niedriger liegen. Rechnet man noch eine Teuerung von ca. 3 % hinzu, da das Zahlenmaterial von [Günthert (2001)] aus dem Jahre 1999/2000 stammt, ist mit ca. 53 – 60 % zu rechnen.

Tab.: 7-3 Kostendifferenz syrischer Kläranlagen (Plan) im Vergleich zu deutschen Kläranlagen (Ist)

EW in TSD	116	152	181	186	239	441
Kostenkennwert Literatur (Günthert) €/EW	249	234	225	223	210	182
Kostendifferenz zu syr. Betrag €/EW	138	134	129	125	118	99
Kostendifferenz in %	55	57	58	56	56	54

Nimmt man eine leichte Modifikation an der o.g. Formel vor, erhält man eine Kostenfunktion mit der die syrischen Kläranlagenkosten (Belebungsgraben) ab ca. EW 50.000 hinreichend genau beschrieben werden können. In der Abb. 7-4 wird die neue Kostenkennlinie in Verbindung mit den ermittelten Kosten aus Tabelle 7-2 vorgestellt (jeweils mit und ohne Nebenkosten).

Abb. 7-4 Investitionskosten Belebungsgraben, mit und ohne Nebenkosten



Für die Kostenkennlinie €/EW inklusive Nebenkosten wurde folgende Formel aus den Tabellenwerten bestimmt:

$$y = 1750 * EW^{-0,234}$$

Für die Kostenkennlinie €/EW ohne Nebenkosten die Formel :

$$y = 1370 * EW^{-0,2335}$$

Um noch ein besseres Bild der Kostenstruktur einer Kläranlage zu erhalten, wird in Tab. 7-4 die prozentuale Aufteilung der Kosten zu den verschiedenen Behandlungsstufen wiedergegeben. Tab. 7-5 gibt den prozentualen Anteil der baulichen und maschinentechnischen Investition wieder. Zu beachten ist, dass in beiden Tabellen die Nebenkosten und Kosten für Unwägbarkeiten in der Aufstellung nicht berücksichtigt wurden.

Tab. : 7-4 Prozentuale Aufteilung der Investitionskosten einer Kläranlage

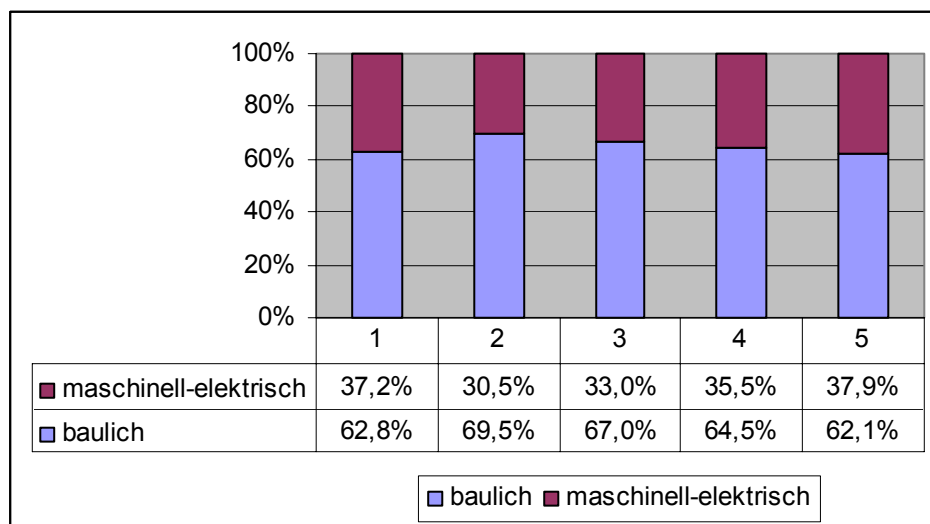
Behandlungsstufen	EW 10.000	EW > 100.000
Zulauf und Mechanische Vorreinigung	15,7%	6 - 16 %
Mechanisch-biologische Abwasserreinigung	40,5%	52 - 57%
Weitergehende Reinigung und Desinfektion	10,2%	3 - 12 %
Schlammbehandlung	10,5%	13 - 16 %
Erschließungskosten	3,9%	1,5 - 8 %
Gebäude und Ausrüstung	12,6%	3,5 - 5,5 %
Sonstiges (Auf-/Abbau, Tests, Allgem. etc.)	6,5%	5 - 6,5 %
	100,0%	100,0%

Tab. 7-5 Prozentuale Aufteilung der Investitionskosten einer Kläranlage (Belebungsgraben) nach bautechn., mech./elektr. Anteilen und Fahrzeuge/Ausrüstung in Prozent.

Anlagenteil	Syrien
Bautechnik	55 - 65
Masch./Elektrotechnik	32 - 41
Fahrzeuge/Ausrüstung	2 - 4
Sonstiges	---

Ein Vergleich mit der Abb. 7-5 zeigt, dass der prozentuale Anteil des bautechnischen bzw. maschinellen Anteils sehr gut mit der statistischen Auswertung einer Benchmarking-Studie für österreichische Kläranlagen [IWAG (2001)] übereinstimmt.

Abb. 7-5 Verteilung der Kapitalkosten einer Kläranlage (baulich – maschinell) [IWAG (2001)]



Dies ist erstaunlich, läge doch die Vermutung nahe, dass aufgrund der erheblich geringeren Personalkosten vor Ort und auf der anderen Seite der Einsatz von ausländischer maschinen- und elektrotechnischer Ausrüstung, der bautechnische Anteil geringer ausfällt. Aber bereits die vorgestellten Einheits- oder Stückpreise (siehe oben) zeigen, dass qualitativ hochwertiges Bauen auch in Syrien seinen Preis hat.

Erkennbar aus der Abb. 7-5 ist auch, dass sowohl der bauliche als auch der maschinelle und elektrische Anteil keinen wesentlichen Zusammenhang mit der Kläranlagengröße aufweisen. Dieser Sachverhalt bestätigt sich auch in beiden Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] und ist wichtig für die Kostenabschätzung anderer Ausbaugrößen.

7.4.2 Betriebskosten

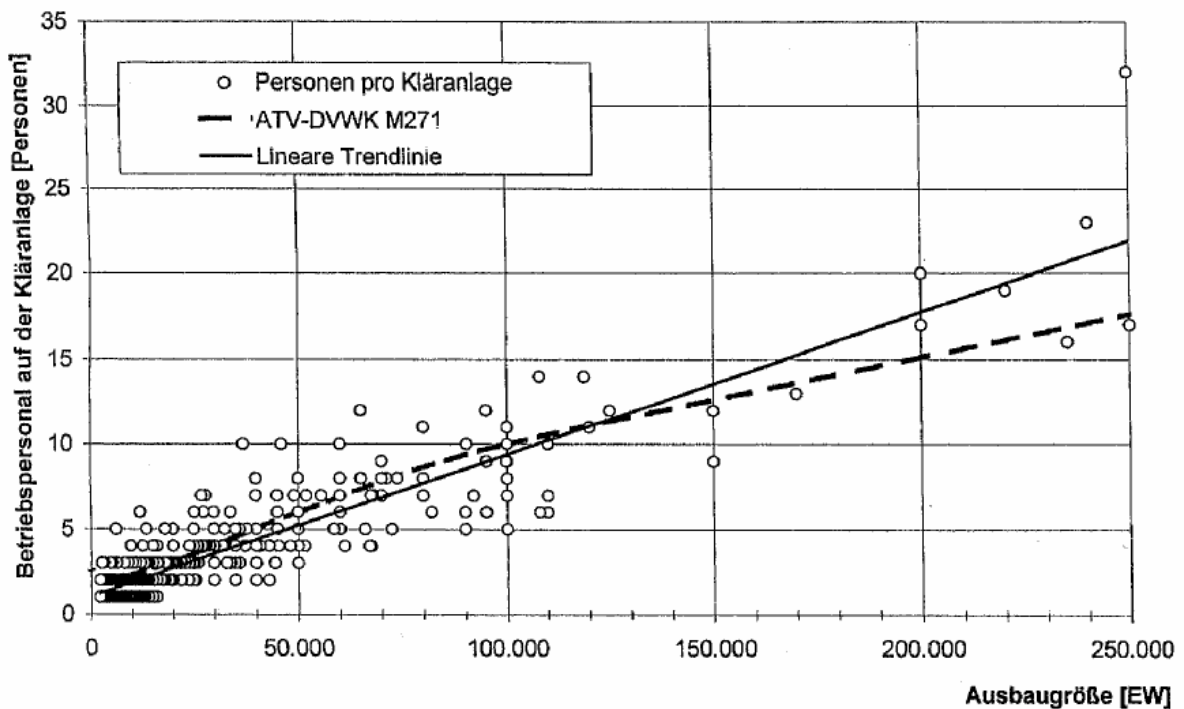
Hinsichtlich des Personalbedarfs ist noch interessant zu erwähnen, dass die Studien [Arabtech (2006); KfW (2006)] von einer Verdopplung des Personals vom Belebungsgraben zum Belebtschlammverfahren ausgehen, [Reicherter (2003)] jedoch keinen Einfluss der Verfahrenstechnik auf die Gesamtzahl des Betriebspersonals feststellen konnte.

Das Merkblatt ATV-DVWK M 271 [ATV-DVWK (1998)] bietet Formeln für die Berechnung des Personalbedarfs von Kläranlagen nach Gewerken an. Nach [Reicherter (2003)], der über 1.300 Kläranlagen hinsichtlich des Personalbedarfes untersuchte, sind diese Formeln bis zu einer Ausbaugröße von EW 150.000 ausreichend genau. Ab einer Ausbaugröße von EW 150.000 empfiehlt Reicherter, vereinfacht einen Wert von 0,85 Personen pro 10.000 EW, anzunehmen.

Die Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] rechnen hier bedeutend großzügiger (bis zu dreimal höher beim Belebtschlammverfahren), dies liegt sicherlich auch mit daran, dass die Gehälter in Syrien erheblich niedriger sind als die z.B. in Deutschland. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird auf den errechneten Personalbedarf ein Aufschlag

von 50 % auf Anlagen zwischen 160.000 EW bis EW 300.000 und 30 % auf Anlagen größer EW 300.000 erhoben. Für Anlagen bis 150.000 EW erfolgt eine proportionale Hochrechnung beginnend von EW 10.000 mit 10 Personen bis EW 150.000 mit 22 Personen. Die Gesamtpersonal-Anzahl entspricht nach dieser Rechnung wieder der Studie [KfW, 2006].

Abb. 7-6 Betriebspersonal auf kommunalen Kläranlagen im Vergleich zu errechneten Werten nach ATV-DVWK M 271 für den Geltungsbereich von 2.000 bis 250.000 EW [Reicherter (2003)]



Die Betriebskosten für vier Ausbaugrößen werden nachfolgend für die Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten dargestellt und die prozentuale Aufteilung wiedergegeben (aus [KfW (2006)]).

Tab. 7-6 Personalkosten pro Jahr (2006)

Personalkosten p.a.	EUR/a	EW 11132	EW 186500	EW 240000	EW 441080
Direktor, Betriebsleiter	9000	9000	9000	9000	9000
Ingenieur	6400	0	6400	6400	6400
Aufsichtsperson	4000	4000	4000	4000	8000
Chemiker	4000	0	4000	4000	8000
Techniker	3500	3500	14000	14000	24500
Labortechniker	3500	3500	7000	17500	28000
Buchhalter	2610	0	2610	2610	2610
Administration/Sekretariat	1885	1885	1885	3770	5655
Fahrer	1885	0	7540	9425	16965
Hilfspersonal	1700	8500	13600	17000	25500
Gesamt		30385	70035	87705	134630
Personalkosten €/(E*a)		2,73	0,38	0,37	0,31

Tab. 7-7 Energiekosten pro Jahr und Anlagengröße (2006)

Energiekosten p.a.				
EW	11.132	186.500	240.242	441.080
kg BSB 5 / a	223.475	3.743.988	4.822.858	8.854.681
kWh/a	566.293	8.275.450	10.608.900	19.342.685
Preis pro kWh in €	0,04167	0,04167	0,04167	0,04167
Energiekosten p.a. in €	23.597	344.838	442.073	806.010
kWh/(E*a)	50,9	44,4	44,2	43,9
kWh/kg BSB5	2,5	2,2	2,2	2,2

Tab. 7-8 Instandhaltungskosten pro Jahr (2006)

EW	11.132	186.500	240.242	441.080
Instandhalt.kosten €/a	50.365	414.008	585.806	750.882
Instandhalt.kosten €/(E*a)	4,52	2,22	2,44	1,70

Tab 7-9 Prozentuale Aufteilung der Betriebskosten

EW	EW 10.000	EW > 100.000
Energiekosten €/a	21,4%	40 - 47 %
Instandhalt.kosten €/(E*a)	45,6%	44 - 52 %
Personalkosten €/a	27,5%	7 - 9 %
Sonstige Kosten €/a	5,5%	1,5 - 2 %

7.4.3 Projektkostenbarwerte / Jahreskosten

Zur Errechnung der Barwerte und der Jahreskosten wurde eine finanzmathematische Aufbereitung der Kostendaten vorgenommen und für zwei Ausbaugrößen im Detail vorgestellt.

Anhand der oben gewonnen Erkenntnisse wurde eine Kostenabschätzung auch für andere Ausbaugrößen vorgenommen und eine Kennlinie entwickelt (siehe Abb.)

Die Prozentuale Aufteilung der Jahreskosten ist Tab. 7-10 zu entnehmen.

Tab. 7-10 Prozentuale Aufteilung der Jahreskosten für den Kläranlagentyp Belebungsgraben

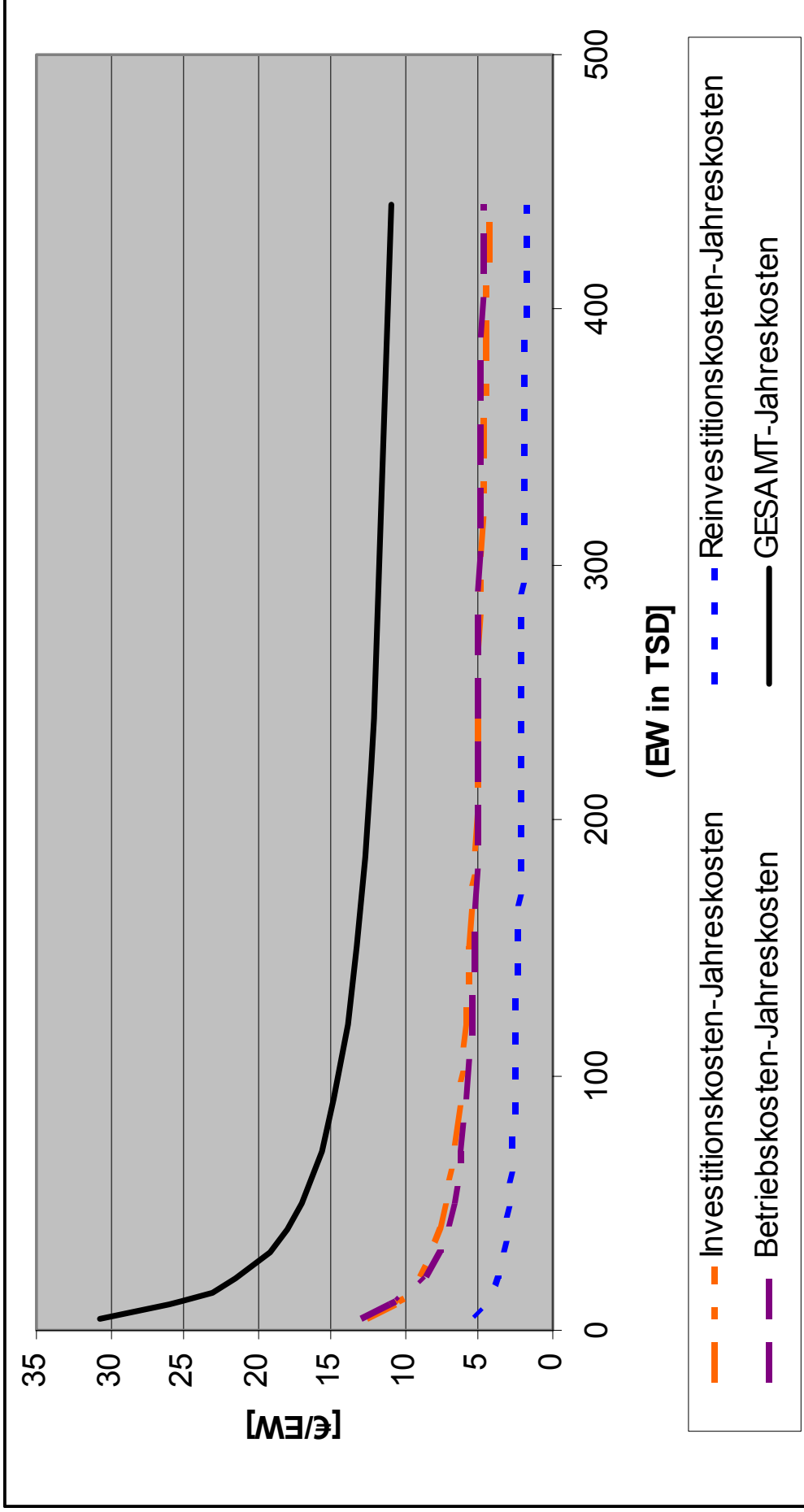
Jahreskosten	EW bis 450.000
Investitionskosten-Jahreskosten	40 - 43 %
Reinvestitionskosten-Jahreskosten	16 - 17 %
Betriebskosten-Jahreskosten	39 - 43 %

Tab. 7-11 Jahreskosten und Projektbarwerte für zwei unterschiedliche Einwohnerwerte für Belebungsgraben

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 4 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$			
für					
Belebungsgraben (extended aeration / oxidation ditch)					
Einwohnerwert (EW)	11153				
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert -> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102
-3. J. Grundstück	14.238 €	1,09273	15.558 €	15.558 €	794 €
-2. J. 40 % Bautechn.	447.154 €	1,06090	474.386 €	474.386 €	24.203 €
-1. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/El.	783.118 €	1,03000	806.611 €	806.611 €	41.153 €
0. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/El.	783.118 €	1,00000	783.118 €	783.118 €	39.955 €
Gesamtinvestitionskosten	2.027.628 €			2.079.673 €	106.105 €
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.				DFAKE	
10. J. M./EL; Fahrz., Ausrüst. ; n=10	757.735 €		757.735 €	0,74409	563.823 €
20. J. M./EL; Fahrz., Ausrüst. ; n=10	757.735 €		757.735 €	0,55368	419.543 €
Gesamtreinvestitionskosten	1.515.470 €			983.366 €	50.171 €
Betriebskosten nach Inbetriebn.				DFAKRP	
				--> KFAKR	<-- DFAKR
Energiekosten	23.597 €		23.597 €	0,05102	19,6004
Instandhaltungskosten	50.365 €		50.365 €	25,8818	610.744 €
Personalkosten	30.385 €		30.385 €		31.160 €
Sonstige Kosten	6.077 €		6.077 €		50.365 €
Gesamtbetriebskosten	110.424 €			2.312.581 €	117.987 €
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				5.375.621 €	274.263 €

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 4 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$			
für					
Belebungsgraben (extended aeration / oxidation ditch)					
Einwohnerwert (EW)	20.000				
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert -> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102
-3. J. Grundstück	21.873 €	1,09273	23.901 €	23.901 €	1.219 €
-2. J. 40 % Bautechn.	836.091 €	1,06090	887.009 €	887.009 €	45.255 €
-1. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/El.	1.295.255 €	1,03000	1.334.113 €	1.334.113 €	68.066 €
0. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/El.	1.295.255 €	1,00000	1.295.255 €	1.295.255 €	66.084 €
Gesamtinvestitionskosten	3.448.475 €			3.540.278 €	180.625 €
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.				DFAKE	
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	1.130.778 €		1.130.778 €	0,74409	841.401 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	1.130.778 €		1.130.778 €	0,55368	42.928 €
Gesamtreinvestitionskosten	2.261.557 €			1.467.490 €	74.871 €
Betriebskosten nach Inbetriebn.				DFAKRP	
				--> KFAKR	<-- DFAKR
Energiekosten	41.670 €		41.670 €	0,05102	19,6004
Instandhaltungskosten	77.270 €		77.270 €	25,8818	1.078.495 €
Personalkosten	33.885 €		33.885 €		55.025 €
Sonstige Kosten	6.777 €		6.777 €		77.270 €
Gesamtbetriebskosten	159.602 €			3.390.006 €	172.957 €
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				8.397.775 €	428.453 €

Abb. 7-7 Jahreskosten für den Kläranlagentyp Belebungsgraben



7.5 Kostenbetrachtung der Abwasserableitung

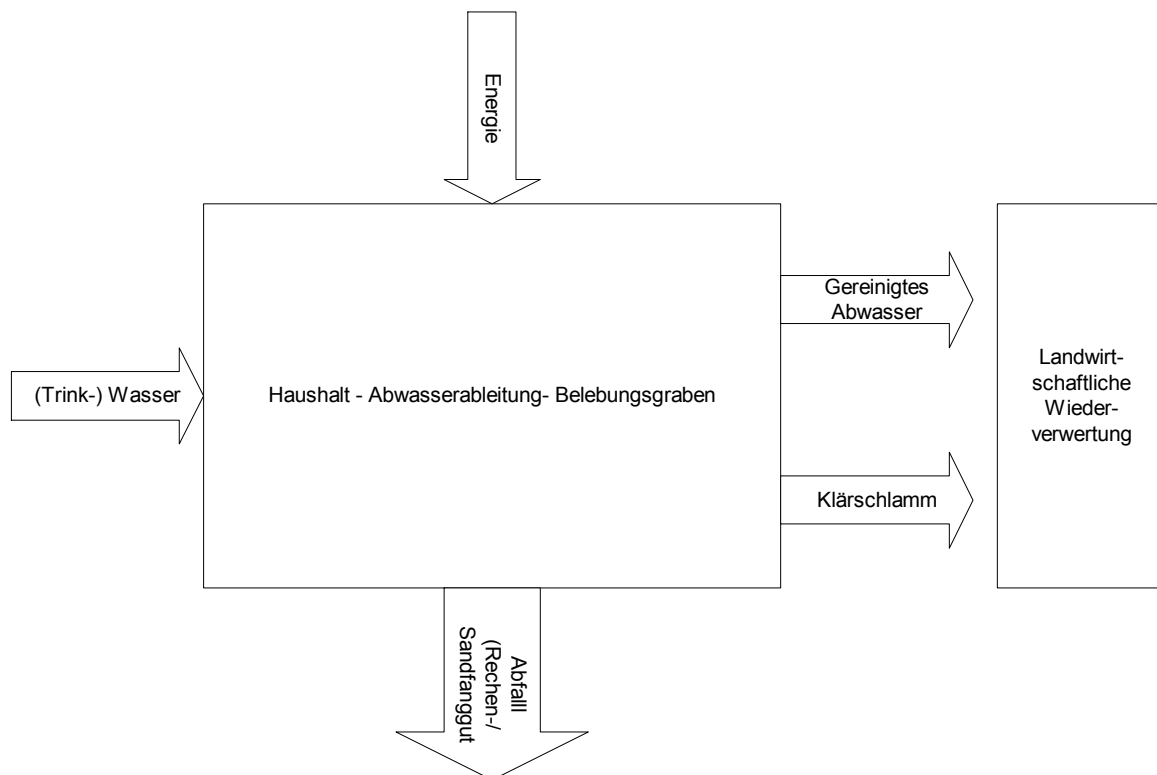
In den Studien [KfW (2006)] wurden Gesamt-Investitionskosten für die Abwasserableitung (Ortskanalisation plus Transportkanäle) in der Projektregion gemäß Tabelle 7-12 angesetzt.

Eine Übertragbarkeit auf andere Projektregionen ist nicht ohne weiteres möglich, da sehr viele Randparameter zu berücksichtigen sind, die zu starken Kostenschwankungen führen können (z.B. vorhandenes nicht vorhandenes Netz, Zustand des Netzes, Bodenverhältnisse, Flächendichte, Abwasseranfall, Entfernungen etc.). Hier werden stets im Einzelfall, also projektweise die Abwasserableitungskosten zu überprüfen sein.

Tab. 7-12 Voraussichtliche Investitionskosten für die Abwasserleitung in der Projektregion [KfW (2006)]

	EW 10000	EW > 150.000
Kosten pro EW in €	130	66 – 74
Kosten pro m (Kanal) in €	102	102 - 111

7.6 Input / Output Modell der Stoffströme / Kosten- / Nutzenparameter der Abwasserverwertung



(Trink-) Wasser

Da eine Schwemmkanalisation für diesen Kläranlagentyp vorgesehen ist, sind keine Trinkwassereinsparungen, die im Abwasserentsorgungssystem begründet liegen, zu erwarten.

Energie

Der Energieeinsatz wurde bereits in den Kostenkalkulationen berücksichtigt. kWh wurden ebenfalls in den vorangegangenen Kapiteln aufgelistet. Das Abwasserentsorgungssystem Belebungsgraben ist ein hoher Energieverzehrer. Der Belebungsgraben braucht viel Energie für die Sauerstoffzuführung.

Rechen- und Sandfanggut

Der Abfall der Rechenanlage entspricht letztendlich auch dem Abfall der von den Haushalten hätte entsorgt werden müssen. D.h. für einen Vergleich der Verfahren ist dieser Punkt unerheblich. Das gesammelte Gut im Sandfang gehört allerdings theoretisch in die Stoffstrom- Betrachtung hinein, soll aber aus Vereinfachungsgründen nicht mit in die Abwasserwertungsrechnung einbezogen werden.

Gereinigtes Abwasser

Nährstoffwerte und Vergleichspreise wurden in der nachfolgenden Tabelle für verschiedene Ausbaugrößen dargestellt (Reinigungsleistung nach FAO/RNEA (2000)).

Klärschlamm

Für das Belebtschlammverfahren hat die Studie [KfW (2003)] einen Schlammanfall von 0,045 m³/(EW*a) bei einem Trockensubstanzgehaltes von 25 % angenommen. Nährstoffwerte des Klärschlammes und Vergleichspreise können ebenfalls der Tabelle entnommen werden.

Tab. Nährstoffwerte für verschiedene Ausbaugrößen, Belebtschlammverfahren

ABWASSERVERWERTUNG	5.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000
Abwasser l/(E*d)	88	88	88	88	88	88
Abwasser m ³ /d	440	980	1760	2640	4400	6160
Abwasser m ³ /a	160.600	357.560	642.400	963.600	1.606.000	2.248.400
Nährstoff N in t	4,8	10,7	19	29	48	67
Nährstoff P in t	1,6	3,6	6	10	16	22
Nährstoff K in t	4,8	10,7	19	29	48	67
Energieäquivalent von N in MWh	48	107	193	289	482	675
Gesamtwert (Nährstoffe Abw.)	7.580	16.877	30.321	45.482	75.803	106.124
Schlammanfall m ³ /a	225	501	900	1350	2250	3150
Nährstoff N in t	4,4	9,8	17,6	26,3	43,9	61,4
Nährstoff P in t	1,9	4,3	7,7	11,6	19,4	27,1
Nährstoff K in t	0,4	0,8	1,4	2,2	3,6	5,0
Energieäquivalent von N in MWh	44	98	176	263	439	614
Gesamtwert (Nährstoffe KS)	5.589	12.443	22.356	33.534	55.890	78.246

7.7 Bewertung des Belebungsgraben

Basierend auf den in Kap. 6.1 und 6.2 vorgegebenen Zielsetzungen soll nun die Erreichung dieser Ziele durch das in diesem Kapitel vorgestellte Abwasserreinigungs-/entsorgungssystem geprüft werden. In der nachfolgenden Übersicht Tab. 7-14 wird zusammenfassend der jeweilige Erfüllungsgrad kommentiert.

Tab. 7-14 Bewertung der Zielreichung / Effektivität des Verfahrens bezogen auf die Ziele

Zielsetzung	Bewertung	Zielerreichungsgrad
Nährstoffe werden weitgehend vollständig in das Ökosystem zurückgeführt – Kreislaufwirtschaft	Hier als zentrales Kläranlagensystem eingesetzt. Abwässer befinden sich so nicht am Entstehungsort. Aufwendiges Rückpumpen der Abwässer ist erforderlich um den sozialen Frieden zu wahren. Durch Nitrifikation und Denitrifikationsphase werden wertvolle Nährstoffe (Stickstoff) vernichtet. Abwasserverwertung ist vorgesehen. In der Winterzeit sind intelligente Lösungen für die Abwasserverwertung gefragt (siehe Kap. 8).	**(*)
Wertvolles Trinkwasser wird eingespart	Keine Einsparung von Trinkwasser möglich, da Schwemmkanalisation als Abwasserableitung.	(*)
Rohstoffe werden eingespart	Rohstoffeinsparung findet nicht sonderlich ausgeprägt statt. Positiv ist, dass keine Phosphat-Fällung vorgesehen ist.	**(*)
Sparsamer Energieverbrauch	Es wird sehr viel Energie für den Belebungsgraben benötigt. Damit kein Energiesparer sondern ein Energieverzehrer.	(*)
Zuverlässiges und betriebssicheres System	Etabliertes System in der Region (z.B. Jordanien). Stabil arbeitendes System, weitgehend unempfindlich gegen Belastungsstöße. Einfacher Betrieb ist möglich, da keine Faulung. Damit ist keine gesonderte Schlammbehandlung (abgesehen von der Trocknung) erforderlich. Insbesondere werden dadurch die Anforderungen an das Klärwerkspersonal gemindert. Geringe Überschussschlammproduktion.	****
Soziale Akzeptanz ist gegeben, kaum Geruchsbildung	Die Geruchsentwicklung während der Behandlungsphasen ist gering. Dieses Verfahren benötigt etwas mehr Platz als sonstige konventionelle Verfahren wie z.B. das Belebtschlammverfahren.	***(*)
Sämtliche Hygieneforderungen werden erfüllt	Desinfizierung der gereinigten Abwässer ist in einer erweiterten Behandlungsphase sicherzustellen (Desinfektionsphase mit Sandfilter und UV-Bestrahlung). UV-Bestrahlung ist empfindlich gegen Schwebstoffe im Abwasser, eventuell können Störungen auftreten. Fortlaufende Labortests sind nötig.	***
Zufriedenstellende Reinigungsleistung	Sehr gute Reinigungsleistung. Die vom Gesetzgeber vorgegebenen Grenzwerte können eingehalten werden. Nötige Nährstoffelimination um in Bewässerungskategorie A hineinzukommen kann realisiert werden.	****

- ****** Ziel sehr gut erfüllt, hohe Effektivität
- ***** Ziel gut erfüllt, gute Effektivität
- **** Ziel gerade noch erfüllt, geringe Effektivität
- *** Ziel nicht erfüllt, nicht Effektiv bezogen auf das Ziel

8 Modellrechnung 2 : Pflanzenkläranlage

8.1 Art und Herkunft des Datenmaterials

Im Jahre 2000 bis 2003 wurde eine Modelluntersuchung zur Effektivität von Pflanzenkläranlagen in semiariden, sommerheißen Gebieten von Frau Abir Mohamed [Mohamed (2004)] in Syrien durchgeführt und mit einer Dissertation abgeschlossen. Drei Jahre lang begleitete Frau Mohamed die Bauarbeiten und den Betrieb einer Pflanzenkläranlage für ca. 5.000 am Kanalnetz angeschlossenen Einwohner und führte für Forschungszwecke notwendige Laboruntersuchungen etc. durch. In der Arbeit finden sich auch Kostenaufstellungen und Hinweise für Auslegungsparameter in semiariden Gebieten.

Die Pflanzenkläranlage arbeitet bis heute erfolgreich und diente deshalb als Grundlage für die nachfolgenden Kostenberechnungen. Einzelne Annahmen für das Hochrechnen auf andere Ausbaugrößen finden sich in der nachfolgenden Anlagenbeschreibung wieder.

8.2 Aufbau und Beschreibung der Anlage

Pflanzenkläranlagen werden vorwiegend für die biologische Behandlung von mechanisch gereinigtem Abwasser eingesetzt. Sie zählen zu den naturnahen, terrestrischen Verfahren der Abwasserbehandlung. Ihr Hauptbestandteil sind Pflanzenbeete (i.d.R. aus Sumpfpflanzen) die horizontal oder vertikal mit vorgereinigtem Abwasser durchströmt werden. Im Arbeitsblatt [ATV-A 262 (1998)] wird die Funktionsweise wie folgt beschrieben:

„Die Wirkungsmechanismen im Bodenkörper sind durch komplexe physikalische, chemische und biologische Vorgänge gekennzeichnet, die sich aus dem Zusammenwirken von Füllmaterial, Sumpfpflanzen, Mikroorganismen, Porenluft und Abwasser ergeben. Die Reinigungsvorgänge beruhen im Wesentlichen auf den im Boden angesiedelten Mikroorganismen; die Pflanzenwurzeln sollen einer Verstopfung der Bodenporen infolge einer Zunahme der Biomasse durch Mikroorganismen entgegenwirken.“

Im Wesentlichen werden zwei Verfahren unterschieden:

- Horizontal durchflossener Bodenfilter und
- Vertikal durchflossener Bodenfilter

Diese Arbeit bezieht sich, der Studie [Mohamed (2004)] folgend, auf den vertikal durchflossenen Bodenfilter.

Eine schematische Darstellung einer Pflanzenkläranlage zeigt die folgende Abbildung 8-1.

In der Abbildung 8-2 werden die einzelnen Behandlungsstufen einer Pflanzenkläranlage vorgestellt.

Abb. 8-1 Schematische Darstellung einer Pflanzenkläranlage

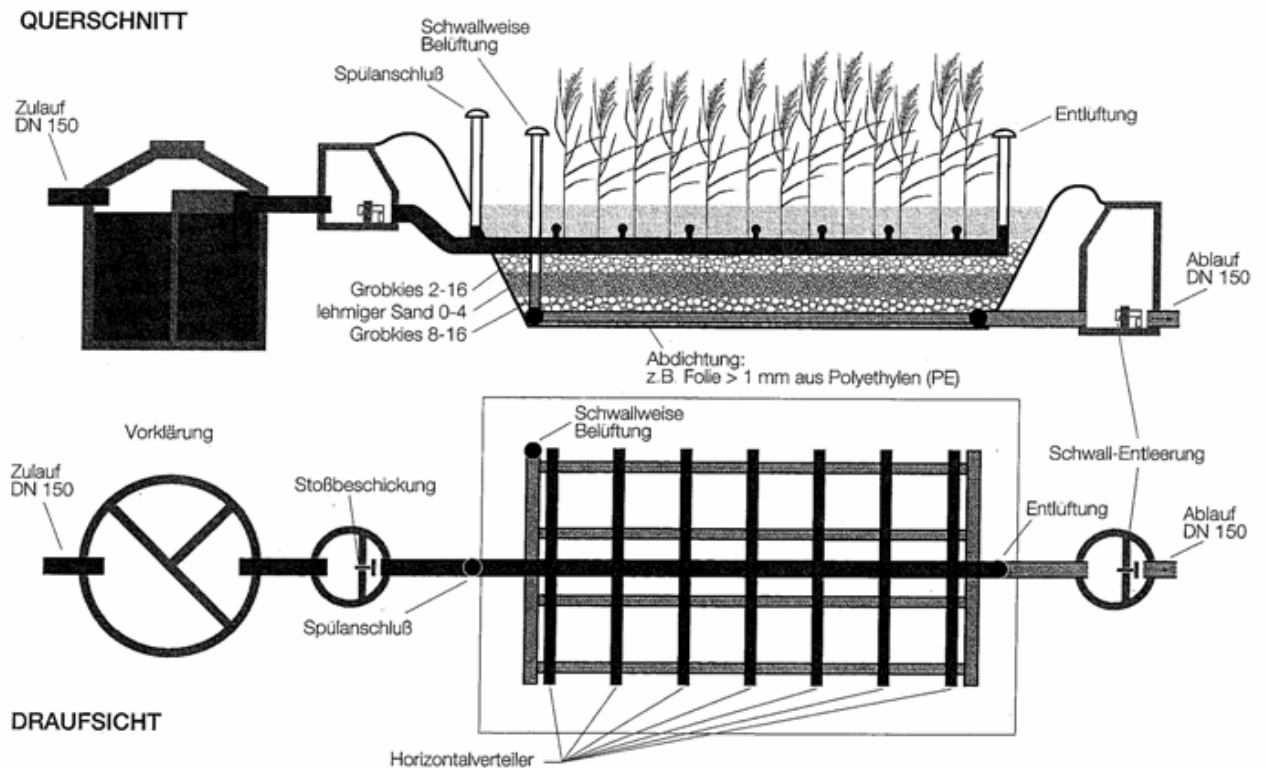
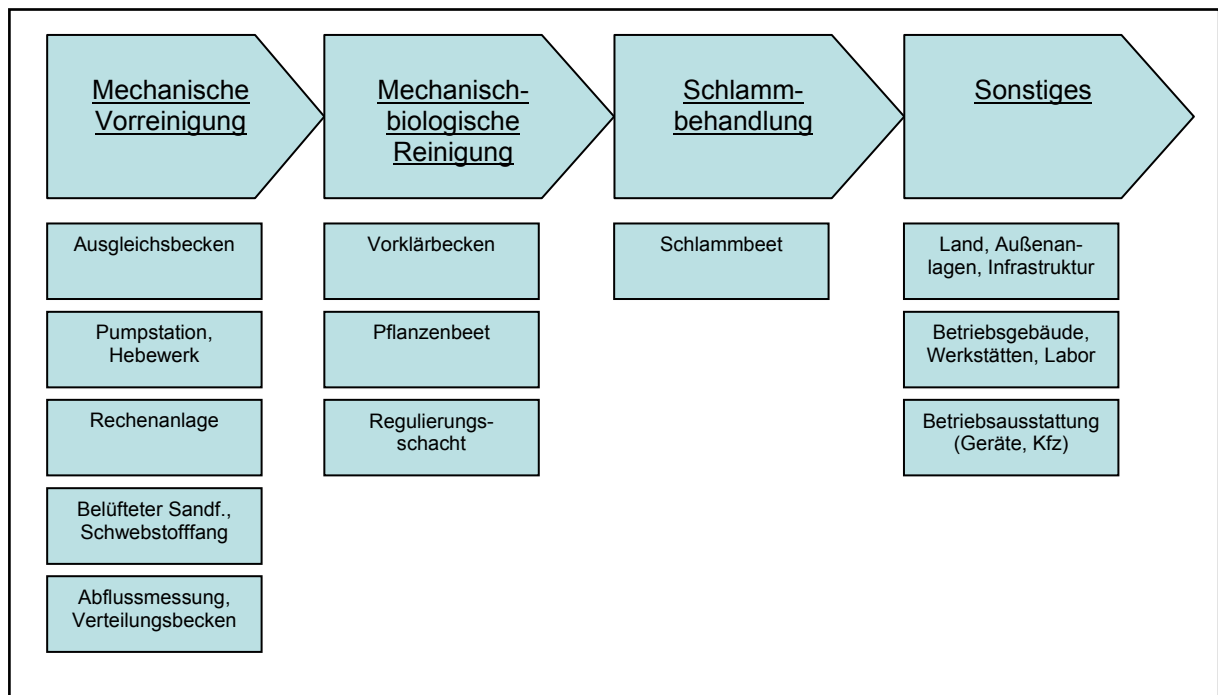


Abbildung 8-2 Behandlungsstufen inkl. Anlagenteile einer Pflanzenkläranlage



8.2.1 Mechanische Vorreinigung

Die Behandlungsstufe der mechanischen Vorreinigung ähnelt der einer konventionellen Kläranlage. Auch hier sind mehrere Verfahrensschritte nötig, um Feststoffe wie Sand, Papier etc. sicher zu entfernen. Low Budget Lösungen oder Verzicht auf einzelne Anlagenelemente in dieser Behandlungsstufe sollten sorgfältig geprüft und nur wenn keine technischen Bedenken bestehen in Erwägung gezogen werden. Pflanzenbeete und die sich dahinter verbergende Technik benötigen weitgehend feststofffreies Abwasser um Kolmation (Verstopfung der Dränagerohre) vorzubeugen. Ein von Feststoffen befreites Abwasser ist somit Grundlage für eine langfristig ausreichende Durchlässigkeit der Pflanzenbeete. [Mohamed (2004)]

Hinsichtlich der Auslegung und der Kosten werden als Orientierungswerte die Kosten der mechanischen Vorreinigung einer konventionellen Kläranlage herangezogen. Die Erfordernis eines Hebewerkes dürfte, insbesondere bei kleineren Kläranlagen, nicht immer gegeben sein. Generell ist anzunehmen, dass die Pflanzenkläranlage auch nur max. die Hälfte der Höhe eines Hebewerkes wie für konventionelle Kläranlagen üblich erreichen, da tiefe Belebungsbecken, Nachklärbecken, Sandfilter etc. entfallen. Auf der anderen Seite muss in der Rechenanlage mit feineren Sieben (6mm, 4mm) und mit einem vor dem Absetzbecken angebrachten Schwebstofffang gerechnet werden.

In dieser Arbeit wird ab einem Einwohnerwert von 5.000 die mechanische Vorklärung analog zur konventionellen Kläranlagentechnik (Kap. 9.4 Belebungsgraben) gerechnet. Kosten für ein Hebewerk werden jedoch nur zur Hälfte eingerechnet (siehe oben). Das Verhältnis Bautechnik zur Maschinenteknik wird in Anlehnung an [KfW (2006)] mit 40 % zu 60 % angesetzt.

8.2.2 Mechanisch-biologische Reinigung

Absetzbecken

Das Absetzbecken dient zur Abtrennung der flockigen und körnigen Bestandteile (absetzbare Stoffe) des Abwassers. Die Absetzzeit für eine Pflanzenkläranlage wird mit $t=2$ bis 2,5 h etwas länger gewählt, um einer späteren Verstopfungsfahr nachfolgender Anlagenteile vorzubeugen. Der sich sammelnde Schlamm am Boden des Trichters wird durch ein Saugrohr täglich abgesaugt und in einen Sammelbehälter verbracht.

Die Absetzwirkung der Vorklärbecken, gemäß ATV-DVWK-A 131 bei einer Durchflusszeit von ca. 2 h in der Vorklärung, führt zu einer Reduzierung des CSB um etwa 1/3. Tab. xxx beinhaltet neben den Werten aus dem Arbeitsblatt auch die entsprechende Umrechnung auf die festgelegten Schmutzfrachten gemäß Kapitel 9.2.

Tab. 8-1 Spezifische Schmutzfrachten in g/(E*d) ohne Berücksichtigung des Schlammwassers

Parameter	Rohabwasser	t = 2 h	Rohabwasser (Syrien)	t = 2 h
BSB5	60	40	55	36
CSB	120	80	100	66
TS	70	25	60	22
TKN	11	10	10	9
P	1,8	1,6	2	1,8

Als Kostenbasis wurden die errechneten Preise der Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] für das Absetzbecken im Belebtschlammverfahren herangezogen. Mit Hilfe eines modifizierten Kostenrichtwertes des Landes Hessen für Vor- und Nachklärbecken [Land

Hessen (2006)] wurde eine sehr gute Annäherung an die veranschlagten Preise aus den Studien erreicht. Das Vorgehen wurde analog Kap. 9.4.5 (Kostenbetrachtung Gesamtkläranlage, Kostenrichtwertbildung) durchgeführt.

Die für die Kostenberechnung eingesetzte Formel lautet:

Beckenvolumen	Kostenrichtwert
$x < 200 \text{ m}^3$	892 €/m ³
$x = 200 \text{ m}^3 \text{ bis } 14.500 \text{ m}^3$	$6338,4 * x^{-0,37}$

Die Aufteilung Bautechnik zu Maschinentechnik wird in Anlehnung an [KfW (2006)] mit 65 % zu 35 % angesetzt.

Pflanzenbeete

Dem Pflanzenbeet vorgeschaltet ist ein Beschickungspumpschacht, von dort wird über Pumpen das Abwasser den Beeten periodisch abwechselnd zugeführt. Die vertikal durchströmten Beete setzen sich aus drei Schichten zusammen, wobei der Boden mit einer starken, wurzelfesten und UV-beständigen Folie abgedichtet wird. Das Beet hat in Längsrichtung ein Gefälle von 0,3 %.

1. Schicht (oben) 35 cm Kies	Kies 8-10 mm Dränage zur Verteilung des mechanisch vorgereinigten Abwassers ca. in 10cm Tiefe.
2. Schicht (mitte) 70 cm Sand	nach Empfehlung der ATV-A-262
3. Schicht (unten) 35 cm Kies	Kies (16 / 14-12 / 8-10 / 1-2 mm) Dränage zur Ableitung des gereinigten Abwassers

Die Auslegung der Pflanzenbeete basiert auf einer BSB-Frachtbelastung pro Tag von 18 g pro Pflanzenbeet m² (CSB-Frachtbelastung von 35,9, bei Annahme eines Verhältnisses von BSB zu CSB von 1:2). Das DWA-Arbeitsblatt DWA-A 262 fordert hier einen Wert von CSB g/(d*m²) kleiner gleich 27, geht aber von deutschen klimatischen Bedingungen aus. Da die Pflanzenbeete in Syrien sehr gut funktionieren, wird die o.g. Frachtbelastung beibehalten. Dies bedeutet bei der unter 9.2 festgelegten spezifischen Schmutzfracht und Berücksichtigung der Vorreinigung im Absetzbecken eine erforderliche Beetfläche von ca. 1,5 m²/EW. Nachfolgend werden nochmals kurz die Auslegungsparameter dargelegt.

Auslegung [Mohamed (2004)] Ausgangsbasis	Für diese Arbeit / Basis : BSB ₅ : 55 g/(E*d)
BSB 270 mg/l → CSB 540 mg/l	CSB 1136 mg/l
5000 EW; 60 l/(E*d); 300 m ³ /d	5000 EW; 88 l/(E*d); 440 m ³ /d
Nach dem Absetzbecken : CSB : 360 g/m ³	Nach dem Absetzbecken : CSB : 757 g/m ³
$360 \text{ g/m}^3 * 300 \text{ m}^3/\text{d} = 108.000 \text{ g/d}$	$757 \text{ g/m}^3 * 440 \text{ m}^3/\text{d} = 333.080 \text{ g/m}^3$
Beetfläche : 3028 m ² → 35,6 g/(m ² *d)	Beetfläche : 9337,8 m ² → 35,6 g/(m ² *d)

Damit liegt der Wert deutlich unter der im Arbeitsblatt ATV A 262 empfohlenen Beetfläche von 2,5 m²/EW. Jedoch wird auch somit der Gefahr einer Versalzung bei zu geringem Wassernachlauf in den heißen und trockenen Sommermonaten vorgebeugt [Mohamed (2004)].

Bepflanzt werden die Beete mit Schilf (*Phragmites australis*), vier Setzlinge pro Quadratmeter.

Nach [Halbach (2003)] können die Kosten für eine Pflanzenkläranlagen in etwa linear mit der Beetfläche für andere Ausbaugrößen hochgerechnet werden, wobei allerdings der Einfluss der Vorklärung herauszurechnen ist. Siehe hierzu [Wagner (2004)]. Als Basiskosten für die Hochrechnung dient die Kostenaufstellung in [Mohamed (2004)]. Die Aufteilung baulicher Teil zum maschinentechnischen Teil wird in Anlehnung an [Mohamed (2004)] mit 90 % zu 10 % angesetzt.

8.2.3 Schlammbehandlung

Das Schlammbehandlungsbeet besteht ebenfalls aus drei Schichten. Der Boden ist mit einer 1mm starken PVC-Folie ausgekleidet. Die Neigung des Beetes beträgt am Boden 5 %. Die Bepflanzung ist mit Schilf und Spanischem Rohr vorgesehen (4 Setzlinge pro m²).

1. Schicht (oben) 70 cm Kies	Kies 16 mm Dränage zur Verteilung desSchlammes.
2. Schicht (mitte) 30 cm Sand	Sand 0,4 – 0,8 mm
3. Schicht (unten) 40 cm Kies	Kies (16 mm, - Bodenschicht, 20cm) Kies (1-14 mm, - 20cm) Dränage, Sammelrohre für Sickerwasser

Als Basiskosten für die Hochrechnung dient die Kostenaufstellung in [Mohamed (2004)]. Die Aufteilung baulicher Teil zum maschinentechnischen Teil wird in Anlehnung an [Mohamed (2004)] mit 90 % zu 10 % angesetzt.

8.2.4 Gebäude, Erschließung

Gebäude, Infrastruktur etc. entspricht weitgehend einer konvent. Kläranlage wie in 9.4 beschrieben. Der m² Bedarf des Belebungsgraben liegt bei 0,54 m²/E und nimmt mit zunehmender Ausbaugröße leicht ab.

Die Kalkulation des Platzbedarfes für die Gesamtanlage pro Einwohner wird in Anlehnung an die Empfehlung der WHO (2006) vorgenommen. Dort ist ein Wert zwischen 3 bis 5 m² pro EW empfohlen. Die in dieser Arbeit verwendete Größe für die Gesamtfläche der Anlage wird auf 3,55 m²/EW festgelegt.

8.3 Aufbereitung der Kostendaten

Die im Kapitel 6.4 beschriebenen Schritte zur Aufbereitung des Datenmaterials wurden durchlaufen und folgende Anpassungen, Umverteilungen vorgenommen:

- Einige Anlagenteile wurden im Kostenbericht in [Mohamed (2006)] nicht angeführt, da sie bereits vorhanden waren oder kostenfrei abgegeben wurden. Eine nachträgliche Berechnung wurde vorgenommen. Die angewendeten Kostensätze bzw. Verrechnungsmodalitäten für die einzelnen Gewerke bzw. Behandlungsstufen sind im Kapitel 6 beschrieben.
- Planungskosten wurden in der Kostenaufstellung der Studie [Mohamed (2004)] nicht berücksichtigt. Wie bereits unter 6.5 festgelegt wird ein Ansatz von 15 % auf die Investitionskosten für die Planung veranschlagt sowie 15 % für Unwägbarkeiten. Reinvestitionen werden mit 5 % Planungskosten plus 15 % Unwägbarkeiten verrechnet.
- Das Grundstück wurde von der Gemeinde kostenlos zur Verfügung gestellt und daher nicht in der Kostenaufstellung berücksichtigt. Für diese Arbeit wird daher der einheitliche Grundstückspreis von EUR 20.635 pro ha angesetzt. Die Grundstücksbemessung (m²-Anzahl) orientiert sich an der unter 6.5 festgelegten Empfehlung.
- Die einzelnen Kosten wurden auf die in der Aufstellung 8.2 vorgestellten Behandlungsstufen und Gewerke zugeordnet. Planungs- und Grundstückskosten wurden unter Nebenkosten zusammengefasst.
- Die Einwohnerwerte (EW) wurden an die Bezugsgröße BSB5 = 55 g/(E*d) angeglichen. Dies führte zu einer Verdreifachung der Beetgröße auf 1,5 m²/EW bzw. zu einer entsprechenden Verringerung des Einwohnerwertes in der Studie.
- Die Dissertation stammte aus dem Jahr 2004, die Investitionskosten sind jedoch 4 Jahre zuvor zum Tragen gekommen. Unter Berücksichtigung einer jährlichen Inflationsrate von 2,5 – 4 % in Syrien, wurden die Preise mit einem Aufschlag von 15 % versehen, dies entspricht einer Teuerung von ca. 2,5 % pro Jahr.

8.4 Kostenbetrachtungen

Die Kosten für ein Absetzbecken orientieren sich an der Studie für das Belebtschlammverfahren [KfW (2006)] und werden über einen Kostenkennwert (Formel) entsprechend eingerechnet.

8.4.1 Investitionskosten

Tab. 8-2 Investitionskosten einer Pflanzenkläranlage aufgeschlüsselt nach Behandlungsstufen

	5.000	10.000	11.132	20.000	30.000	40.000	50.000
Zulauf und Mechanische Vorreinigung	95.627	162.675	176.612	258.284	352.428	407.992	446.860
Mechanisch-biologische Abwasserreinigung	227.166	454.332	505.762	908.664	1.328.843	1.741.250	2.149.627
Schlammbehandlung	14.491	28.981	32.262	57.963	86.944	115.926	144.907
Geländeerschließung	35.860	65.358	69.034	111.720	156.601	210.716	254.342
Gebäude und Ausrüstung	70.000	170.000	170.000	170.000	190.000	230.000	260.000
Sonstiges (Auf-/Abbau, Tests, Elektr. etc.)	23.414	46.575	50.206	77.849	108.108	137.346	164.113
ZWISCHENSUMME I	466.557	927.921	1.003.876	1.584.479	2.222.925	2.843.230	3.419.848
Endbetrag I (ohne Nebenkosten) in TSD	536.541	1.067.110	1.154.457	1.822.151	2.556.364	3.269.714	3.932.825
€/ EW (I)	107	107	104	91	85	82	79
Endbetrag I (mit Nebenkosten) in TSD	671.008	1.335.149	1.447.821	2.311.419	3.263.736	4.192.062	5.062.612
€/ EW (I)	134	134	130	116	109	105	101

Tab. 8-3 Prozentuale Aufteilung der Investitionskosten für eine Pflanzenkläranlage, ohne Nebenkosten und Unwägbarkeiten

	10.000	15.000	30.000	100.000
Zulauf und Mechanische Vorreinigung	17,5%	17,6%	15,9%	10,3%
Mechanisch-biologische Abwasserreinigung	49,0%	54,2%	59,8%	67,6%
Schlammbehandlung	3,1%	3,5%	3,9%	4,7%
Geländeerschließung	7,0%	6,3%	7,0%	6,8%
Gebäude und Ausrüstung	18,3%	13,5%	8,5%	5,9%
Sonstiges (Auf-/Abbau, Tests, Elektr. etc.)	5,0%	5,0%	4,9%	4,7%
ZWISCHENSUMME I	100%	100%	100%	100%

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich ist, werden je nach Ausbaugröße 50 bis 67 % der Kosten durch das Pflanzenbeet selbst bestimmt. Ändern sich die Auslegungsparameter, z.B. durch Ansatz eines niedrigeren BSB₅ wird dies über die nun geringere benötigte Beetfläche zu einer deutlichen Reduzierung der Investitionskosten führen.

Die Kosten für Gebäude und Ausrüstung orientierten sich nach den Studien [ArabTech, KfW (2006)] und nehmen bei kleineren Ausbaugrößen einen hohen prozentualen Anteil an.

8.4.2 Betriebskosten

In den nachfolgenden Tabellen werden die Betriebskosten für verschiedene Ausbaugrößen vorgestellt.

Tab. 8-4 Personalkosten pro Jahr für eine Pflanzenkläranlage

Personalkosten	EUR/a	5.000	10.000	11.132	20.000	30.000
		EW	EW	EW	EW	EW
Direktor, Betriebsleiter	9000	0	9.000	9.000	9.000	9.000
Ingenieur	6400	0	0	0	0	0
Aufsichtsperson	4000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Chemiker	4000	0	0	0	0	0
Techniker	3500	3.500	3.500	3.500	7.000	7.000
Labortechniker	3500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Buchhalter	2610	0	0	0	0	0
Administration/Sekretariat	1885	0	1.885	1.885	1.885	1.885
Fahrer	1885	0	0	0	0	1.885
Hilfspersonal	1700	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500
GESAMT		19.500	30.385	30.385	33.885	35.770
€/ EW		3,90	3,04	2,73	1,69	1,19

Tab. 8-5 Energiekosten einer Pflanzenkläranlage pro Jahr

Energiekosten p.a.	5.000	10.000	11.132	20.000	30.000	40.000	50.000
kWh/(E*a)	5,9	5,7	5,7	5,5	5,3	5,1	4,9
kWh/a	29.500	57.000	63.452	110.000	159.000	204.000	245.000
€/a	1.229	2.375	2.644	4.584	6.626	8.501	10.209
€/ EW	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20

Tab. 8-6 Betriebskostenübersicht für verschiedene Ausbaugrößen einer Pflanzenkläranlage pro Jahr

BETRIEBSKOSTEN	5.000	11.132	15.000	20.000	30.000	40.000
Energie	1.229	2.644	3.500	4.584	6.626	8.501
Instandh	12.555	25.033	30.009	36.309	49.740	62.076
Personal	19.500	30.385	30.385	33.885	35.770	37.470
Sonstiges	3.900	6.077	6.077	6.777	7.154	7.494

8.4.3 Projektkostenbarwerte / Jahreskosten

Tab. 8-7 Jahreskosten und Projektbarwerte für zwei unterschiedliche Einwohnerwerte für Pflanzenkläranlagen

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 4 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$				
für						
Pflanzenkläranlage						
Einwohnerwert (EW)	11153					
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102	
-3. J. Grundstück	120.195 €	1,09273	131.341 €	131.341 €	6.701 €	
-2. J. 40 % Bautechn.	367.545 €	1,06090	389.928 €	389.928 €	19.894 €	
-1. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	480.041 €	1,03000	494.442 €	494.442 €	25.226 €	
0. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	480.041 €	1,00000	480.041 €	480.041 €	24.492 €	
Gesamtinvestitionskosten	1.447.821 €			1.495.751 €	76.313 €	
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.			DFAKE			
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,74409	44.924 €	2.292 €
15. J. Pflanzenkläranlage 2 ; n=15	1.151.805 €		1.151.805 €	0,64186	739.298 €	37.719 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,55368	33.428 €	1.706 €
Gesamtinvestitionskosten	1.272.555 €			817.651 €	41.717 €	
Betriebskosten nach Inbetriebn.			DFAKRP	--> KFAKR 0,05102	<-- DFAKR 19,6004	
Energiekosten	2.644 €		2.644 €	25,8818	68.433 €	3.491 €
Instandhaltungskosten	25.033 €		25.033 €		490.647 €	25.033 €
Personalkosten	30.385 €		30.385 €		595.558 €	30.385 €
Sonstige Kosten	6.077 €		6.077 €		119.112 €	6.077 €
Gesamtbetriebskosten	64.139 €			1.273.750 €	64.986 €	
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				3.587.152 €	183.016 €	

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 4 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$				
für						
Pflanzenkläranlagen						
Einwohnerwert (EW)	20.000					
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102	
-3. J. Grundstück	215.945 €	1,09273	235.970 €	235.970 €	12.039 €	
-2. J. 40 % Bautechn.	608.573 €	1,06090	645.635 €	645.635 €	32.940 €	
-1. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	743.450 €	1,03000	765.754 €	765.754 €	39.069 €	
0. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	743.450 €	1,00000	743.450 €	743.450 €	37.931 €	
Gesamtinvestitionskosten	2.311.419 €			2.390.809 €	121.979 €	
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.			DFAKE			
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,74409	44.924 €	2.292 €
15. J. Pflanzenkläranlage 2 ; n=15	1.852.884 €		1.852.884 €	0,64186	1.189.292 €	60.678 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,55368	33.428 €	1.706 €
Gesamtinvestitionskosten	1.973.634 €			1.267.645 €	64.675 €	
Betriebskosten nach Inbetriebn.			DFAKRP	--> KFAKR 0,05102	<-- DFAKR 19,6004	
Energiekosten	4.584 €		4.584 €	25,8818	118.634 €	6.053 €
Instandhaltungskosten	36.309 €		36.309 €		711.675 €	36.309 €
Personalkosten	33.885 €		33.885 €		664.160 €	33.885 €
Sonstige Kosten	6.777 €		6.777 €		132.832 €	6.777 €
Gesamtbetriebskosten	81.555 €			1.627.301 €	83.024 €	
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				5.285.755 €	269.678 €	

8.5 Kostenbetrachtung der Abwasserableitung

In den Studien [KfW (2006)] wurden Gesamt-Investitionskosten für die Abwasserableitung (Ortskanalisation plus Transportkanäle) in der Projektregion gemäß Tabelle 8-8 angesetzt.

Eine Übertragbarkeit auf andere Projektregionen ist nicht ohne weiteres möglich, da sehr viele Randparameter zu berücksichtigen sind, die zu starken Kostenschwankungen führen können (z.B. vorhandenes nicht vorhandenes Netz, Zustand des Netzes, Bodenverhältnisse, Flächendichte, Abwasseranfall, Entfernungen etc.). Hier werden stets im Einzelfall, also projektweise die Abwasserableitungskosten zu überprüfen sein.

Tab. 8-8 Voraussichtliche Investitionskosten für die Abwasserleitung in der Projektregion [KfW (2006)]

	EW 10000	EW > 150.000
Kosten pro EW in €	130	66 – 74
Kosten pro m (Kanal) in €	102	102 - 111

8.5 Reinigungsleistung

Tab. 8-8 Reinigungsleistung der Pflanzenkläranlage über einen Zeitraum von 3 Jahren [Mohamed (2004)]

Parameter	Einheit	Abwasser- beschaffenheit (Probennahme)	Reinigungsziel SASMO			Reinigungs- ergebnis (Probennahme) über 3 Jahre)	Prozentuale Reinigungs- leistung (Zulauf- Ablauf)
			A	B	C		
Temperatur	°C					+ 5 bis + 30	
pH-Wert		7,32 – 7,5	6-9	6-9	6-9	7,3 – 7,5	
CSB	mg/l	330 - 521	75	200	300	70 - 78	76 – 85 %
BSB5		220 - 320	30	100	150	32 - 80	64 – 90 %
S.S		130 - 201					
NH4-N		76,3 - 140	3	5	---	2 - 20	74 – 98 %
NO3-N		22 - 25	20	25	25	25 - 55	keine Red.
NO2-N		0,2 – 0,3	<1	<1	<1	0,4 – 0,9	
PO4-P		21,3 - 22,2				1 - 5	76 – 95 %
Pathogene Keime	Keime pro 100ml	11000	< 1000	< 100000	< 10000	1000	
Wurmeier	pro 100 ml	100 - 1000	< 1	< 1	< 1	1 pro Liter	
Cadmium	mg/l	0,004				0,002	
Nickel		0,03				0,02	
Zink		0,9				0,5	
Blei		0,025				0,01	
Kupfer		1,1				0,5	

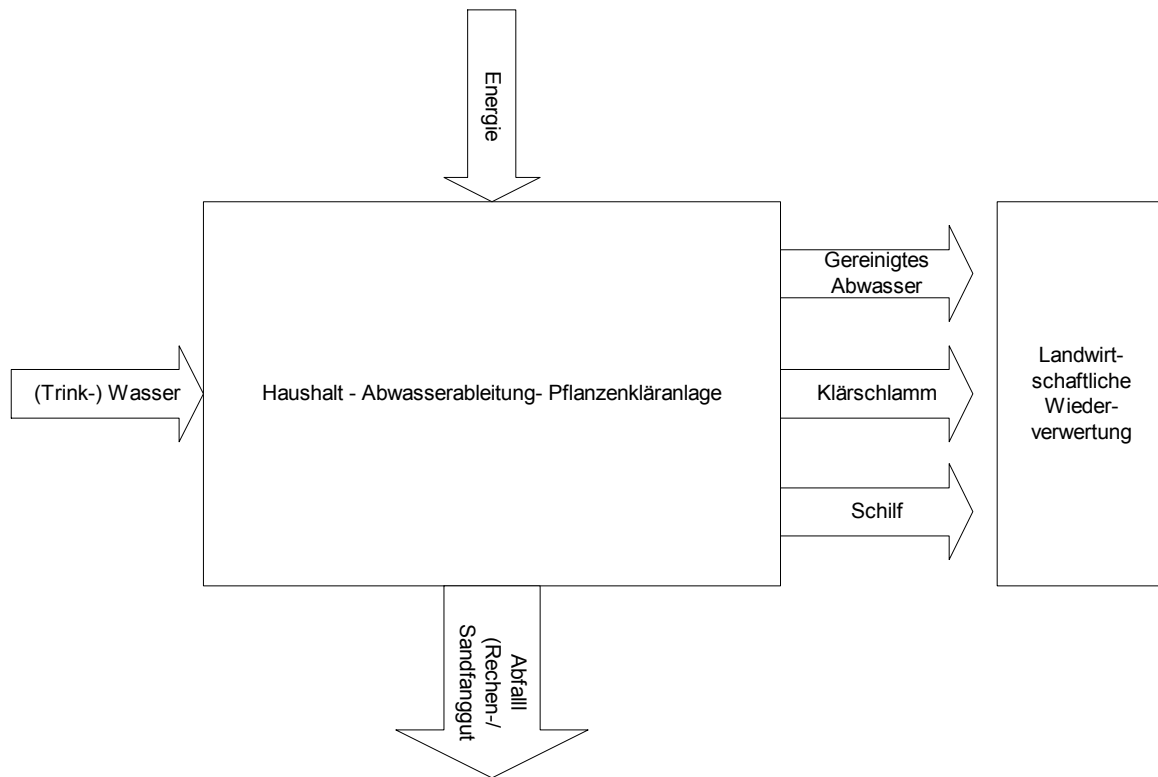
Die Pflanzenkläranlage überzeugt hinsichtlich Ihrer Fähigkeit zur Keimverminderung. Pathogene Keime und Wurmeier werden zuverlässig eliminiert, so dass eine nachgeschaltete Desinfektionsstufe nicht erforderlich ist. Die geforderte Reinigungsleistung in Bezug auf die Hygieneparameter wird somit voll erfüllt.

Hinsichtlich der Abbauleistung von organischen Substanzen lagen die Werte bei 82 – 85 %. SASMO-Klasse B wurde voll erfüllt, zeitweise auch Klasse A.

Schwermetalle sind grundsätzlich nicht abbaubar, sondern setzen sich im Schlamm ab oder werden im Boden zurückgehalten oder durchfließen die Anlage unverändert. Ein Teil der im Boden zurückgehaltenen Schwermetalle werden von den Pflanzen aufgenommen. [Mohamed (2004)]

Der Überwachungswert NH4-N wurde deutlich überschritten und selbst die Reinigungsklasse C nicht mehr erreicht. [Mohamed (2004)] vermutet hier einen Zusammenhang mit der hydraulischen Belastung der Beete. Daher ist anzunehmen, dass der Parameter NH4-N aufgrund der Anpassung an die spezifische BSB₅ Fracht von 55 g/l*d besser ausfallen wird. Die Neubemessung auf die in dieser Arbeit vereinbarten Standards führte zu einer Verdreifachung der Pflanzenbeetfläche aber gemessen an der hydraulischen Belastung nur zu einer Verdoppelung, d.h., die hydraulische Belastung wird aufgrund der größeren Beetfläche geringer ausfallen und damit wahrscheinlich den Parameter NH4-N entscheidend reduzieren, so dass die Klasse B erreicht werden kann.

8.6 Input / Output Modell der Stoffströme / Kosten- / Nutzenparameter der Abwasserverwertung



(Trink-) Wasser

Da eine Schwemmkanalisation für diesen Kläranlagentyp vorgesehen ist, sind keine Trinkwassereinsparungen, die im Abwasserentsorgungssystem begründet liegen, zu erwarten.

Energie

Der Energieeinsatz wurde bereits in den Kostenkalkulationen berücksichtigt. kWh wurden ebenfalls in den vorangegangenen Kapiteln aufgelistet. Das Abwasserentsorgungssystem Pflanzenkläranlage verbraucht nur wenig Energie, kann sogar bei kleineren Anlagen und geografisch günstig gelegenen Standorten ohne Energie auskommen.

Rechen- und Sandfanggut

Der Abfall der Rechenanlage entspricht letztendlich auch dem Abfall der von den Haushalten hätte entsorgt werden müssen. D.h. für einen Vergleich der Verfahren ist dieser Punkt unerheblich. Das gesammelte Gut im Sandfang gehört allerdings theoretisch in die Stoffstrom- Betrachtung hinein, soll aber aus Vereinfachungsgründen nicht mit in die Abwasserverwertungsrechnung einbezogen werden.

Schilf

Als Nebenprodukt der Pflanzenkläranlage entsteht auch Schilf, das u.U. in der Landwirtschaft wiederverwendet werden kann. Die dabei erwirtschafteten Beträge sind ebenfalls

theoretisch einzurechnen, aufgrund der geringen Höhe werden sie jedoch in Kosten-Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.

Gereinigtes Abwasser

Nährstoffwerte und Vergleichspreise wurden in der nachfolgenden Tabelle für verschiedene Ausbaugrößen dargestellt (Reinigungsleistung nach FAO/RNEA (2000)). Es wird ein Evaporationsverlust von 10 % angenommen (gereinigtes Abwasser = 80 l/(E*d).

Klärschlamm

Ein Schlammanfall von 0,015 m³/(EW*a) wird angenommen. Nährstoffwerte des Klärschlammes und Vergleichspreise können ebenfalls der Tabelle entnommen werden.

ABWASSERVERWERTUNG	5.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000
Abwasser l/(E*d)	80	80	80	80	80	80
Abwasser m ³ /d	400	891	1600	2400	4000	5600
Abwasser m ³ /a	146.000	325.054	584.000	876.000	1.460.000	2.044.000
Nährstoff N in t	4,4	9,8	17,5	26,3	43,8	61,3
Nährstoff P in t	1,5	3,3	5,8	8,8	14,6	20,4
Nährstoff K in t	4,4	9,8	17,5	26,3	43,8	61,3
Energieäquivalent von N in MWh	44	98	175	263	438	613
Gesamtwert (Nährstoffe Abw.)	7.580	16.877	30.321	45.482	75.803	106.124
Schlammanfall m ³ /a	75	167	300	450	750	1.050
Nährstoff N in t	1,5	3,3	5,9	8,8	14,6	20,5
Nährstoff P in t	0,6	1,4	2,6	3,9	6,5	9,0
Nährstoff K in t	0,1	0,3	0,5	0,7	1,2	1,7
Energieäquivalent von N in MWh	15	33	59	88	146	205
Gesamtwert (Nährstoffe KS)	1.863	4.148	7.452	11.178	18.630	26.082

8.7 Bewertung der Pflanzenkläranlage

Basierend auf den in Kap. 6.1 und 6.2 vorgegebenen Zielsetzungen soll nun die Erreichung dieser Ziele durch das in diesem Kapitel vorgestellte Abwasserreinigungs-/entsorgungssystem geprüft werden. In der nachfolgenden Übersicht Tab. 8-14 wird zusammenfassend der jeweilige Erfüllungsgrad kommentiert.

Tab. 8-14 Bewertung der Zielreichung / Effektivität des Verfahrens bezogen auf die Ziele

Zielsetzung	Bewertung	Zielerreichungsgrad
Nährstoffe werden weitgehend vollständig in das Ökosystem zurückgeführt – Kreislaufwirtschaft	Bietet sich für dezentrale Lösungen an. Abwasserwertung ist ohne Probleme möglich. Nährstoffe werden zwar reduziert, sind aber nicht so stark als wie bei einer Kläranlage mit Denitrifikation. In der Winterzeit sind intelligente Lösungen für die Abwasserwertung gefragt (siehe Kap. 8).	***
Wertvolles Trinkwasser wird eingespart	Keine Einsparung von Trinkwasser möglich, da Schwemmkanalisation als Abwasserleitung.	(*)
Rohstoffe werden eingespart	Rohstoffeinsparung findet nicht ausgeprägt statt.	**(*)
Sparsamer Energieverbrauch	Der Energiebedarf der Pflanzenkläranlage ist gering. Ein Energiesparer.	***(*)
Zuverlässiges und betriebssicheres System	In Syrien bereits in einem Pilotprojekt erfolgreich erprobt. Bei guter Wartung ein zuverlässiges System. Jedoch besteht stets die Gefahr der Kolmation. Die Betriebsführung ist nicht vollständig manipulierbar. Belastungstöße können Probleme bereiten, da auf extreme Schwankungen der Abwassermenge nicht einstellbar. Versalzungsgefahr in Trockenperioden. Minimale technische Ausrüstung notwendig, einfach zu bedienende Anlage. Nur wenig geschultes Personal ist erforderlich. Pflanzen und Bakterien sind empfindlich gegen harte Chemikalien. Die Bevölkerung muß entsprechend geschult werden, keine aggressiven Reinigungsmittel, Öle etc. über die Toiletten zu entsorgen.	**(*)
Soziale Akzeptanz ist gegeben, kaum Geruchsbildung	Die Pflanzenkläranlage hat einen großen Flächenbedarf. Dies könnte in manchen Ortschaften ein Problem darstellen. Auf der anderen Seite lässt sie sich sehr gut in das Landschaftsbild einpassen. Gute Akzeptanz bei der Bevölkerung, wie das Pilotprojekt in Syrien gezeigt hat [Mohamed (2004)]. Geringe Geruchsbelästigung. Moskitoprobleme konnten in Syrien nicht beobachtet werden.	***(*)
Sämtliche Hygieneforderungen werden erfüllt	Sehr gute Reduzierung der Keimzahlen und Wurmeier. Abwasser erfüllt ohne zusätzliche Nachbehandlung die Hygienekriterien.	****
Zufriedenstellende Reinigungsleistung	Die Reinigungsleistung kann in der kalten Jahreszeit in Syrien etwas herabgesetzt sein. Nötige Nährstoffelimination (Stickstoff) um in Bewässerungskategorie A hineinzukommen ist nicht ohne weiteres möglich.	***

- **** Ziel sehr gut erfüllt, hohe Effektivität
- *** Ziel gut erfüllt, gute Effektivität
- ** Ziel gerade noch erfüllt, geringe Effektivität
- * Ziel nicht erfüllt, nicht Effektiv bezogen auf das Ziel

8 Modellrechnung 2 : Pflanzenkläranlage

8.1 Art und Herkunft des Datenmaterials

Im Jahre 2000 bis 2003 wurde eine Modelluntersuchung zur Effektivität von Pflanzenkläranlagen in semiariden, sommerheißen Gebieten von Frau Abir Mohamed [Mohamed (2004)] in Syrien durchgeführt und mit einer Dissertation abgeschlossen. Drei Jahre lang begleitete Frau Mohamed die Bauarbeiten und den Betrieb einer Pflanzenkläranlage für ca. 5.000 am Kanalnetz angeschlossenen Einwohner und führte für Forschungszwecke notwendige Laboruntersuchungen etc. durch. In der Arbeit finden sich auch Kostenaufstellungen und Hinweise für Auslegungsparameter in semiariden Gebieten.

Die Pflanzenkläranlage arbeitet bis heute erfolgreich und diente deshalb als Grundlage für die nachfolgenden Kostenberechnungen. Einzelne Annahmen für das Hochrechnen auf andere Ausbaugrößen finden sich in der nachfolgenden Anlagenbeschreibung wieder.

8.2 Aufbau und Beschreibung der Anlage

Pflanzenkläranlagen werden vorwiegend für die biologische Behandlung von mechanisch gereinigtem Abwasser eingesetzt. Sie zählen zu den naturnahen, terrestrischen Verfahren der Abwasserbehandlung. Ihr Hauptbestandteil sind Pflanzenbeete (i.d.R. aus Sumpfpflanzen) die horizontal oder vertikal mit vorgereinigtem Abwasser durchströmt werden. Im Arbeitsblatt [ATV-A 262 (1998)] wird die Funktionsweise wie folgt beschrieben:

„Die Wirkungsmechanismen im Bodenkörper sind durch komplexe physikalische, chemische und biologische Vorgänge gekennzeichnet, die sich aus dem Zusammenwirken von Füllmaterial, Sumpfpflanzen, Mikroorganismen, Porenluft und Abwasser ergeben. Die Reinigungsvorgänge beruhen im Wesentlichen auf den im Boden angesiedelten Mikroorganismen; die Pflanzenwurzeln sollen einer Verstopfung der Bodenporen infolge einer Zunahme der Biomasse durch Mikroorganismen entgegenwirken.“

Im Wesentlichen werden zwei Verfahren unterschieden:

- Horizontal durchflossener Bodenfilter und
- Vertikal durchflossener Bodenfilter

Diese Arbeit bezieht sich, der Studie [Mohamed (2004)] folgend, auf den vertikal durchflossenen Bodenfilter.

Eine schematische Darstellung einer Pflanzenkläranlage zeigt die folgende Abbildung 8-1.

In der Abbildung 8-2 werden die einzelnen Behandlungsstufen einer Pflanzenkläranlage vorgestellt.

Abb. 8-1 Schematische Darstellung einer Pflanzenkläranlage

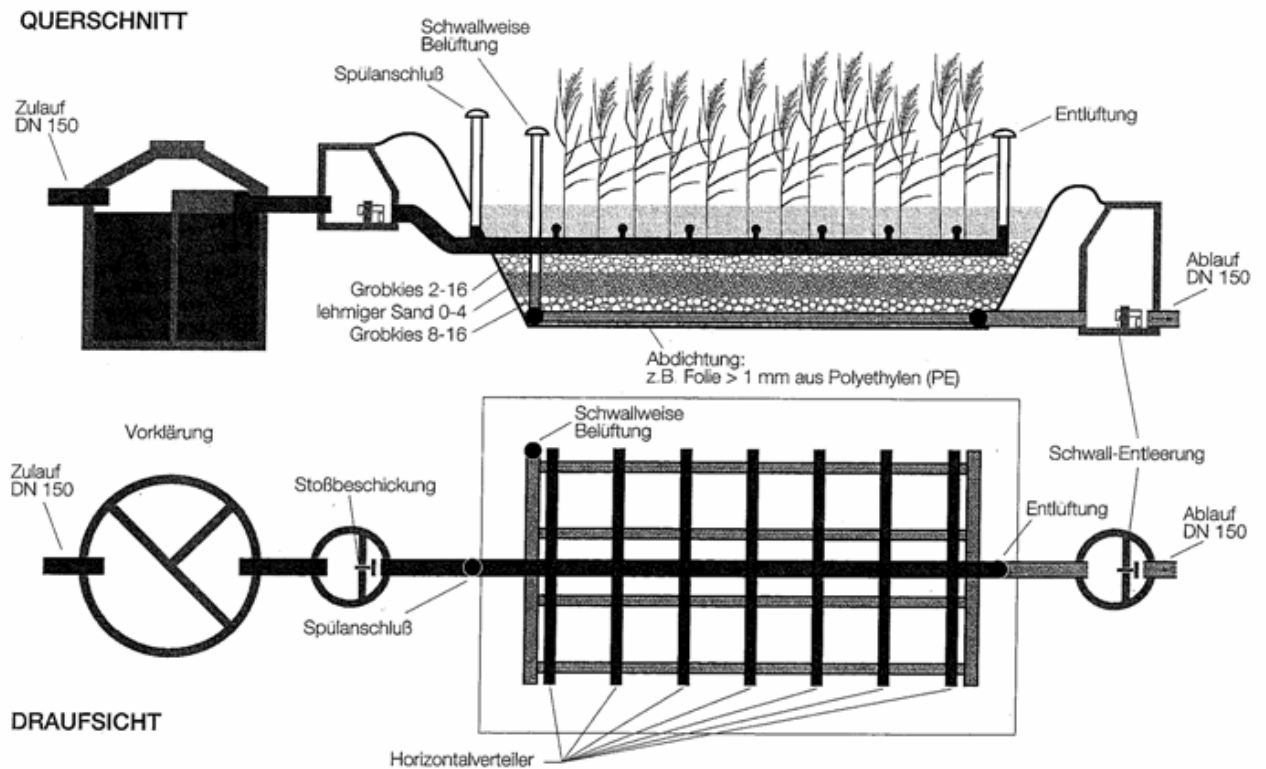
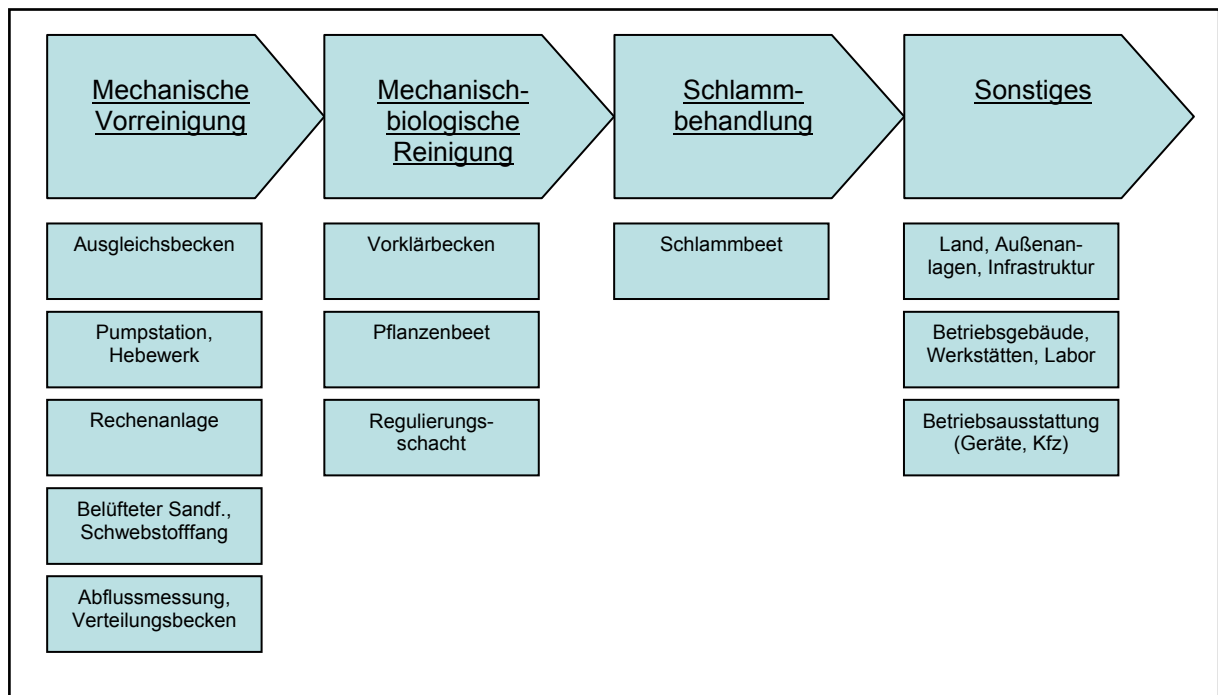


Abbildung 8-2 Behandlungsstufen inkl. Anlagenteile einer Pflanzenkläranlage



8.2.1 Mechanische Vorreinigung

Die Behandlungsstufe der mechanischen Vorreinigung ähnelt der einer konventionellen Kläranlage. Auch hier sind mehrere Verfahrensschritte nötig, um Feststoffe wie Sand, Papier etc. sicher zu entfernen. Low Budget Lösungen oder Verzicht auf einzelne Anlagenelemente in dieser Behandlungsstufe sollten sorgfältig geprüft und nur wenn keine technischen Bedenken bestehen in Erwägung gezogen werden. Pflanzenbeete und die sich dahinter verbergende Technik benötigen weitgehend feststofffreies Abwasser um Kolmation (Verstopfung der Dränagerohre) vorzubeugen. Ein von Feststoffen befreites Abwasser ist somit Grundlage für eine langfristig ausreichende Durchlässigkeit der Pflanzenbeete. [Mohamed (2004)]

Hinsichtlich der Auslegung und der Kosten werden als Orientierungswerte die Kosten der mechanischen Vorreinigung einer konventionellen Kläranlage herangezogen. Die Erfordernis eines Hebewerkes dürfte, insbesondere bei kleineren Kläranlagen, nicht immer gegeben sein. Generell ist anzunehmen, dass die Pflanzenkläranlage auch nur max. die Hälfte der Höhe eines Hebewerkes wie für konventionelle Kläranlagen üblich erreichen, da tiefe Belebungsbecken, Nachklärbecken, Sandfilter etc. entfallen. Auf der anderen Seite muss in der Rechenanlage mit feineren Sieben (6mm, 4mm) und mit einem vor dem Absetzbecken angebrachten Schwebstofffang gerechnet werden.

In dieser Arbeit wird ab einem Einwohnerwert von 5.000 die mechanische Vorklärung analog zur konventionellen Kläranlagentechnik (Kap. 9.4 Belebungsgraben) gerechnet. Kosten für ein Hebewerk werden jedoch nur zur Hälfte eingerechnet (siehe oben). Das Verhältnis Bautechnik zur Maschinenteknik wird in Anlehnung an [KfW (2006)] mit 40 % zu 60 % angesetzt.

8.2.2 Mechanisch-biologische Reinigung

Absetzbecken

Das Absetzbecken dient zur Abtrennung der flockigen und körnigen Bestandteile (absetzbare Stoffe) des Abwassers. Die Absetzzeit für eine Pflanzenkläranlage wird mit $t=2$ bis 2,5 h etwas länger gewählt, um einer späteren Verstopfungsgefahr nachfolgender Anlagenteile vorzubeugen. Der sich sammelnde Schlamm am Boden des Trichters wird durch ein Saugrohr täglich abgesaugt und in einen Sammelbehälter verbracht.

Die Absetzwirkung der Vorklärbecken, gemäß ATV-DVWK-A 131 bei einer Durchflusszeit von ca. 2 h in der Vorklärung, führt zu einer Reduzierung des CSB um etwa 1/3. Tab. xxx beinhaltet neben den Werten aus dem Arbeitsblatt auch die entsprechende Umrechnung auf die festgelegten Schmutzfrachten gemäß Kapitel 9.2.

Tab. 8-1 Spezifische Schmutzfrachten in g/(E*d) ohne Berücksichtigung des Schlammwassers

Parameter	Rohabwasser	t = 2 h	Rohabwasser (Syrien)	t = 2 h
BSB5	60	40	55	36
CSB	120	80	100	66
TS	70	25	60	22
TKN	11	10	10	9
P	1,8	1,6	2	1,8

Als Kostenbasis wurden die errechneten Preise der Studien [Arabtech (2006), KfW (2006)] für das Absetzbecken im Belebtschlammverfahren herangezogen. Mit Hilfe eines modifizierten Kostenrichtwertes des Landes Hessen für Vor- und Nachklärbecken [Land

Hessen (2006)] wurde eine sehr gute Annäherung an die veranschlagten Preise aus den Studien erreicht. Das Vorgehen wurde analog Kap. 9.4.5 (Kostenbetrachtung Gesamtkläranlage, Kostenrichtwertbildung) durchgeführt.

Die für die Kostenberechnung eingesetzte Formel lautet:

Beckenvolumen	Kostenrichtwert
$x < 200 \text{ m}^3$	892 €/m ³
$x = 200 \text{ m}^3 \text{ bis } 14.500 \text{ m}^3$	$6338,4 * x^{-0,37}$

Die Aufteilung Bautechnik zu Maschinenteknik wird in Anlehnung an [KfW (2006)] mit 65 % zu 35 % angesetzt.

Pflanzenbeete

Dem Pflanzenbeet vorgeschaltet ist ein Beschickungspumpschacht, von dort wird über Pumpen das Abwasser den Beeten periodisch abwechselnd zugeführt. Die vertikal durchströmten Beete setzen sich aus drei Schichten zusammen, wobei der Boden mit einer starken, wurzelfesten und UV-beständigen Folie abgedichtet wird. Das Beet hat in Längsrichtung ein Gefälle von 0,3 %.

1. Schicht (oben) 35 cm Kies	Kies 8-10 mm Dränage zur Verteilung des mechanisch vorgereinigten Abwassers ca. in 10cm Tiefe.
2. Schicht (mitte) 70 cm Sand	nach Empfehlung der ATV-A-262
3. Schicht (unten) 35 cm Kies	Kies (16 / 14-12 / 8-10 / 1-2 mm) Dränage zur Ableitung des gereinigten Abwassers

Die Auslegung der Pflanzenbeete basiert auf einer BSB-Frachtbelastung pro Tag von 18 g pro Pflanzenbeet m² (CSB-Frachtbelastung von 35,9, bei Annahme eines Verhältnisses von BSB zu CSB von 1:2). Das DWA-Arbeitsblatt DWA-A 262 fordert hier einen Wert von CSB g/(d*m²) kleiner gleich 27, geht aber von deutschen klimatischen Bedingungen aus. Da die Pflanzenbeete in Syrien sehr gut funktionieren, wird die o.g. Frachtbelastung beibehalten. Dies bedeutet bei der unter 9.2 festgelegten spezifischen Schmutzfracht und Berücksichtigung der Vorreinigung im Absetzbecken eine erforderliche Beetfläche von ca. 1,5 m²/EW. Nachfolgend werden nochmals kurz die Auslegungsparameter dargelegt.

Auslegung [Mohamed (2004)] Ausgangsbasis	Für diese Arbeit / Basis : BSB ₅ : 55 g/(E*d)
BSB 270 mg/l → CSB 540 mg/l	CSB 1136 mg/l
5000 EW; 60 l/(E*d); 300 m ³ /d	5000 EW; 88 l/(E*d); 440 m ³ /d
Nach dem Absetzbecken : CSB : 360 g/m ³	Nach dem Absetzbecken : CSB : 757 g/m ³
$360 \text{ g/m}^3 * 300 \text{ m}^3/\text{d} = 108.000 \text{ g/d}$	$757 \text{ g/m}^3 * 440 \text{ m}^3/\text{d} = 333.080 \text{ g/m}^3$
Beetfläche : 3028 m ² → 35,6 g/(m ² *d)	Beetfläche : 9337,8 m ² → 35,6 g/(m ² *d)

Damit liegt der Wert deutlich unter der im Arbeitsblatt ATV A 262 empfohlenen Beetfläche von 2,5 m²/EW. Jedoch wird auch somit der Gefahr einer Versalzung bei zu geringem Wassernachlauf in den heißen und trockenen Sommermonaten vorgebeugt [Mohamed (2004)].

Bepflanzt werden die Beete mit Schilf (*Phragmites australis*), vier Setzlinge pro Quadratmeter.

Nach [Halbach (2003)] können die Kosten für eine Pflanzenkläranlagen in etwa linear mit der Beetfläche für andere Ausbaugrößen hochgerechnet werden, wobei allerdings der Einfluss der Vorklärung herauszurechnen ist. Siehe hierzu [Wagner (2004)]. Als Basiskosten für die Hochrechnung dient die Kostenaufstellung in [Mohamed (2004)]. Die Aufteilung baulicher Teil zum maschinentechnischen Teil wird in Anlehnung an [Mohamed (2004)] mit 90 % zu 10 % angesetzt.

8.2.3 Schlammbehandlung

Das Schlammbehandlungsbeet besteht ebenfalls aus drei Schichten. Der Boden ist mit einer 1mm starken PVC-Folie ausgekleidet. Die Neigung des Beetes beträgt am Boden 5 %. Die Bepflanzung ist mit Schilf und Spanischem Rohr vorgesehen (4 Setzlinge pro m²).

1. Schicht (oben) 70 cm Kies	Kies 16 mm Dränage zur Verteilung desSchlammes.
2. Schicht (mitte) 30 cm Sand	Sand 0,4 – 0,8 mm
3. Schicht (unten) 40 cm Kies	Kies (16 mm, - Bodenschicht, 20cm) Kies (1-14 mm, - 20cm) Dränage, Sammelrohre für Sickerwasser

Als Basiskosten für die Hochrechnung dient die Kostenaufstellung in [Mohamed (2004)]. Die Aufteilung baulicher Teil zum maschinentechnischen Teil wird in Anlehnung an [Mohamed (2004)] mit 90 % zu 10 % angesetzt.

8.2.4 Gebäude, Erschließung

Gebäude, Infrastruktur etc. entspricht weitgehend einer konvent. Kläranlage wie in 9.4 beschrieben. Der m² Bedarf des Belebungsgraben liegt bei 0,54 m²/E und nimmt mit zunehmender Ausbaugröße leicht ab.

Die Kalkulation des Platzbedarfes für die Gesamtanlage pro Einwohner wird in Anlehnung an die Empfehlung der WHO (2006) vorgenommen. Dort ist ein Wert zwischen 3 bis 5 m² pro EW empfohlen. Die in dieser Arbeit verwendete Größe für die Gesamtfläche der Anlage wird auf 3,55 m²/EW festgelegt.

8.3 Aufbereitung der Kostendaten

Die im Kapitel 6.4 beschriebenen Schritte zur Aufbereitung des Datenmaterials wurden durchlaufen und folgende Anpassungen, Umverteilungen vorgenommen:

- Einige Anlagenteile wurden im Kostenbericht in [Mohamed (2006)] nicht angeführt, da sie bereits vorhanden waren oder kostenfrei abgegeben wurden. Eine nachträgliche Berechnung wurde vorgenommen. Die angewendeten Kostensätze bzw. Verrechnungsmodalitäten für die einzelnen Gewerke bzw. Behandlungsstufen sind im Kapitel 6 beschrieben.
- Planungskosten wurden in der Kostenaufstellung der Studie [Mohamed (2004)] nicht berücksichtigt. Wie bereits unter 6.5 festgelegt wird ein Ansatz von 15 % auf die Investitionskosten für die Planung veranschlagt sowie 15 % für Unwägbarkeiten. Reinvestitionen werden mit 5 % Planungskosten plus 15 % Unwägbarkeiten verrechnet.
- Das Grundstück wurde von der Gemeinde kostenlos zur Verfügung gestellt und daher nicht in der Kostenaufstellung berücksichtigt. Für diese Arbeit wird daher der einheitliche Grundstückspreis von EUR 20.635 pro ha angesetzt. Die Grundstücksbemessung (m²-Anzahl) orientiert sich an der unter 6.5 festgelegten Empfehlung.
- Die einzelnen Kosten wurden auf die in der Aufstellung 8.2 vorgestellten Behandlungsstufen und Gewerke zugeordnet. Planungs- und Grundstückskosten wurden unter Nebenkosten zusammengefasst.
- Die Einwohnerwerte (EW) wurden an die Bezugsgröße BSB5 = 55 g/(E*d) angeglichen. Dies führte zu einer Verdreifachung der Beetgröße auf 1,5 m²/EW bzw. zu einer entsprechenden Verringerung des Einwohnerwertes in der Studie.
- Die Dissertation stammte aus dem Jahr 2004, die Investitionskosten sind jedoch 4 Jahre zuvor zum Tragen gekommen. Unter Berücksichtigung einer jährlichen Inflationsrate von 2,5 – 4 % in Syrien, wurden die Preise mit einem Aufschlag von 15 % versehen, dies entspricht einer Teuerung von ca. 2,5 % pro Jahr.

8.4 Kostenbetrachtungen

Die Kosten für ein Absetzbecken orientieren sich an der Studie für das Belebtschlammverfahren [KfW (2006)] und werden über einen Kostenkennwert (Formel) entsprechend eingerechnet.

8.4.1 Investitionskosten

Tab. 8-2 Investitionskosten einer Pflanzenkläranlage aufgeschlüsselt nach Behandlungsstufen

	5.000	10.000	11.132	20.000	30.000	40.000	50.000
Zulauf und Mechanische Vorreinigung	95.627	162.675	176.612	258.284	352.428	407.992	446.860
Mechanisch-biologische Abwasserreinigung	227.166	454.332	505.762	908.664	1.328.843	1.741.250	2.149.627
Schlammbehandlung	14.491	28.981	32.262	57.963	86.944	115.926	144.907
Geländeerschließung	35.860	65.358	69.034	111.720	156.601	210.716	254.342
Gebäude und Ausrüstung	70.000	170.000	170.000	170.000	190.000	230.000	260.000
Sonstiges (Auf-/Abbau, Tests, Elektr. etc.)	23.414	46.575	50.206	77.849	108.108	137.346	164.113
ZWISCHENSUMME I	466.557	927.921	1.003.876	1.584.479	2.222.925	2.843.230	3.419.848
Endbetrag I (ohne Nebenkosten) in TSD	536.541	1.067.110	1.154.457	1.822.151	2.556.364	3.269.714	3.932.825
€/ EW (I)	107	107	104	91	85	82	79
Endbetrag I (mit Nebenkosten) in TSD	671.008	1.335.149	1.447.821	2.311.419	3.263.736	4.192.062	5.062.612
€/ EW (I)	134	134	130	116	109	105	101

Tab. 8-3 Prozentuale Aufteilung der Investitionskosten für eine Pflanzenkläranlage, ohne Nebenkosten und Unwägbarkeiten

	10.000	15.000	30.000	100.000
Zulauf und Mechanische Vorreinigung	17,5%	17,6%	15,9%	10,3%
Mechanisch-biologische Abwasserreinigung	49,0%	54,2%	59,8%	67,6%
Schlammbehandlung	3,1%	3,5%	3,9%	4,7%
Geländeerschließung	7,0%	6,3%	7,0%	6,8%
Gebäude und Ausrüstung	18,3%	13,5%	8,5%	5,9%
Sonstiges (Auf-/Abbau, Tests, Elektr. etc.)	5,0%	5,0%	4,9%	4,7%
ZWISCHENSUMME I	100%	100%	100%	100%

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich ist, werden je nach Ausbaugröße 50 bis 67 % der Kosten durch das Pflanzenbeet selbst bestimmt. Ändern sich die Auslegungsparameter, z.B. durch Ansatz eines niedrigeren BSB₅ wird dies über die nun geringere benötigte Beetfläche zu einer deutlichen Reduzierung der Investitionskosten führen.

Die Kosten für Gebäude und Ausrüstung orientierten sich nach den Studien [ArabTech, KfW (2006)] und nehmen bei kleineren Ausbaugrößen einen hohen prozentualen Anteil an.

8.4.2 Betriebskosten

In den nachfolgenden Tabellen werden die Betriebskosten für verschiedene Ausbaugrößen vorgestellt.

Tab. 8-4 Personalkosten pro Jahr für eine Pflanzenkläranlage

Personalkosten	EUR/a	5.000	10.000	11.132	20.000	30.000
		EW	EW	EW	EW	EW
Direktor, Betriebsleiter	9000	0	9.000	9.000	9.000	9.000
Ingenieur	6400	0	0	0	0	0
Aufsichtsperson	4000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Chemiker	4000	0	0	0	0	0
Techniker	3500	3.500	3.500	3.500	7.000	7.000
Labortechniker	3500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Buchhalter	2610	0	0	0	0	0
Administration/Sekretariat	1885	0	1.885	1.885	1.885	1.885
Fahrer	1885	0	0	0	0	1.885
Hilfspersonal	1700	8.500	8.500	8.500	8.500	8.500
GESAMT		19.500	30.385	30.385	33.885	35.770
€/ EW		3,90	3,04	2,73	1,69	1,19

Tab. 8-5 Energiekosten einer Pflanzenkläranlage pro Jahr

Energiekosten p.a.	5.000	10.000	11.132	20.000	30.000	40.000	50.000
kWh/(E*a)	5,9	5,7	5,7	5,5	5,3	5,1	4,9
kWh/a	29.500	57.000	63.452	110.000	159.000	204.000	245.000
€/a	1.229	2.375	2.644	4.584	6.626	8.501	10.209
€/ EW	0,25	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20

Tab. 8-6 Betriebskostenübersicht für verschiedene Ausbaugrößen einer Pflanzenkläranlage pro Jahr

BETRIEBSKOSTEN	5.000	11.132	15.000	20.000	30.000	40.000
Energie	1.229	2.644	3.500	4.584	6.626	8.501
Instandh	12.555	25.033	30.009	36.309	49.740	62.076
Personal	19.500	30.385	30.385	33.885	35.770	37.470
Sonstiges	3.900	6.077	6.077	6.777	7.154	7.494

8.4.3 Projektkostenbarwerte / Jahreskosten

Tab. 8-7 Jahreskosten und Projektbarwerte für zwei unterschiedliche Einwohnerwerte für Pflanzenkläranlagen

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 4 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$				
für						
Pflanzenkläranlage						
Einwohnerwert (EW)	11153					
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102	
-3. J. Grundstück	120.195 €	1,09273	131.341 €	131.341 €	6.701 €	
-2. J. 40 % Bautechn.	367.545 €	1,06090	389.928 €	389.928 €	19.894 €	
-1. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	480.041 €	1,03000	494.442 €	494.442 €	25.226 €	
0. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	480.041 €	1,00000	480.041 €	480.041 €	24.492 €	
Gesamtinvestitionskosten	1.447.821 €			1.495.751 €	76.313 €	
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.			DFAKE			
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,74409	44.924 €	2.292 €
15. J. Pflanzenkläranlage 2 ; n=15	1.151.805 €		1.151.805 €	0,64186	739.298 €	37.719 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,55368	33.428 €	1.706 €
Gesamtinvestitionskosten	1.272.555 €			817.651 €	41.717 €	
Betriebskosten nach Inbetriebn.			DFAKRP	--> KFAKR 0,05102	<-- DFAKR 19,6004	
Energiekosten	2.644 €		2.644 €	25,8818	68.433 €	3.491 €
Instandhaltungskosten	25.033 €		25.033 €		490.647 €	25.033 €
Personalkosten	30.385 €		30.385 €		595.558 €	30.385 €
Sonstige Kosten	6.077 €		6.077 €		119.112 €	6.077 €
Gesamtbetriebskosten	64.139 €			1.273.750 €	64.986 €	
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				3.587.152 €	183.016 €	

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 4 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$				
für						
Pflanzenkläranlagen						
Einwohnerwert (EW)	20.000					
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102	
-3. J. Grundstück	215.945 €	1,09273	235.970 €	235.970 €	12.039 €	
-2. J. 40 % Bautechn.	608.573 €	1,06090	645.635 €	645.635 €	32.940 €	
-1. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	743.450 €	1,03000	765.754 €	765.754 €	39.069 €	
0. J. 30 % Bautechn. / 50 % M/EI.	743.450 €	1,00000	743.450 €	743.450 €	37.931 €	
Gesamtinvestitionskosten	2.311.419 €			2.390.809 €	121.979 €	
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.			DFAKE			
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,74409	44.924 €	2.292 €
15. J. Pflanzenkläranlage 2 ; n=15	1.852.884 €		1.852.884 €	0,64186	1.189.292 €	60.678 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	60.375 €		60.375 €	0,55368	33.428 €	1.706 €
Gesamtinvestitionskosten	1.973.634 €			1.267.645 €	64.675 €	
Betriebskosten nach Inbetriebn.			DFAKRP	--> KFAKR 0,05102	<-- DFAKR 19,6004	
Energiekosten	4.584 €		4.584 €	25,8818	118.634 €	6.053 €
Instandhaltungskosten	36.309 €		36.309 €		711.675 €	36.309 €
Personalkosten	33.885 €		33.885 €		664.160 €	33.885 €
Sonstige Kosten	6.777 €		6.777 €		132.832 €	6.777 €
Gesamtbetriebskosten	81.555 €			1.627.301 €	83.024 €	
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				5.285.755 €	269.678 €	

8.5 Kostenbetrachtung der Abwasserableitung

In den Studien [KfW (2006)] wurden Gesamt-Investitionskosten für die Abwasserableitung (Ortskanalisation plus Transportkanäle) in der Projektregion gemäß Tabelle 8-8 angesetzt.

Eine Übertragbarkeit auf andere Projektregionen ist nicht ohne weiteres möglich, da sehr viele Randparameter zu berücksichtigen sind, die zu starken Kostenschwankungen führen können (z.B. vorhandenes nicht vorhandenes Netz, Zustand des Netzes, Bodenverhältnisse, Flächendichte, Abwasseranfall, Entfernungen etc.). Hier werden stets im Einzelfall, also projektweise die Abwasserableitungskosten zu überprüfen sein.

Tab. 8-8 Voraussichtliche Investitionskosten für die Abwasserleitung in der Projektregion [KfW (2006)]

	EW 10000	EW > 150.000
Kosten pro EW in €	130	66 – 74
Kosten pro m (Kanal) in €	102	102 - 111

8.5 Reinigungsleistung

Tab. 8-8 Reinigungsleistung der Pflanzenkläranlage über einen Zeitraum von 3 Jahren [Mohamed (2004)]

Parameter	Einheit	Abwasser- beschaffenheit (Probennahme)	Reinigungsziel SASMO			Reinigungs- ergebnis (Probennahme) über 3 Jahre)	Prozentuale Reinigungs- leistung (Zulauf- Ablauf)
			A	B	C		
Temperatur	°C					+ 5 bis + 30	
pH-Wert		7,32 – 7,5	6-9	6-9	6-9	7,3 – 7,5	
CSB	mg/l	330 - 521	75	200	300	70 - 78	76 – 85 %
BSB5		220 - 320	30	100	150	32 - 80	64 – 90 %
S.S		130 - 201					
NH4-N		76,3 - 140	3	5	---	2 - 20	74 – 98 %
NO3-N		22 - 25	20	25	25	25 - 55	keine Red.
NO2-N		0,2 – 0,3	<1	<1	<1	0,4 – 0,9	
PO4-P		21,3 - 22,2				1 - 5	76 – 95 %
Pathogene Keime	Keime pro 100ml	11000	< 1000	< 100000	< 10000	1000	
Wurmeier	pro 100 ml	100 - 1000	< 1	< 1	< 1	1 pro Liter	
Cadmium	mg/l	0,004				0,002	
Nickel		0,03				0,02	
Zink		0,9				0,5	
Blei		0,025				0,01	
Kupfer		1,1				0,5	

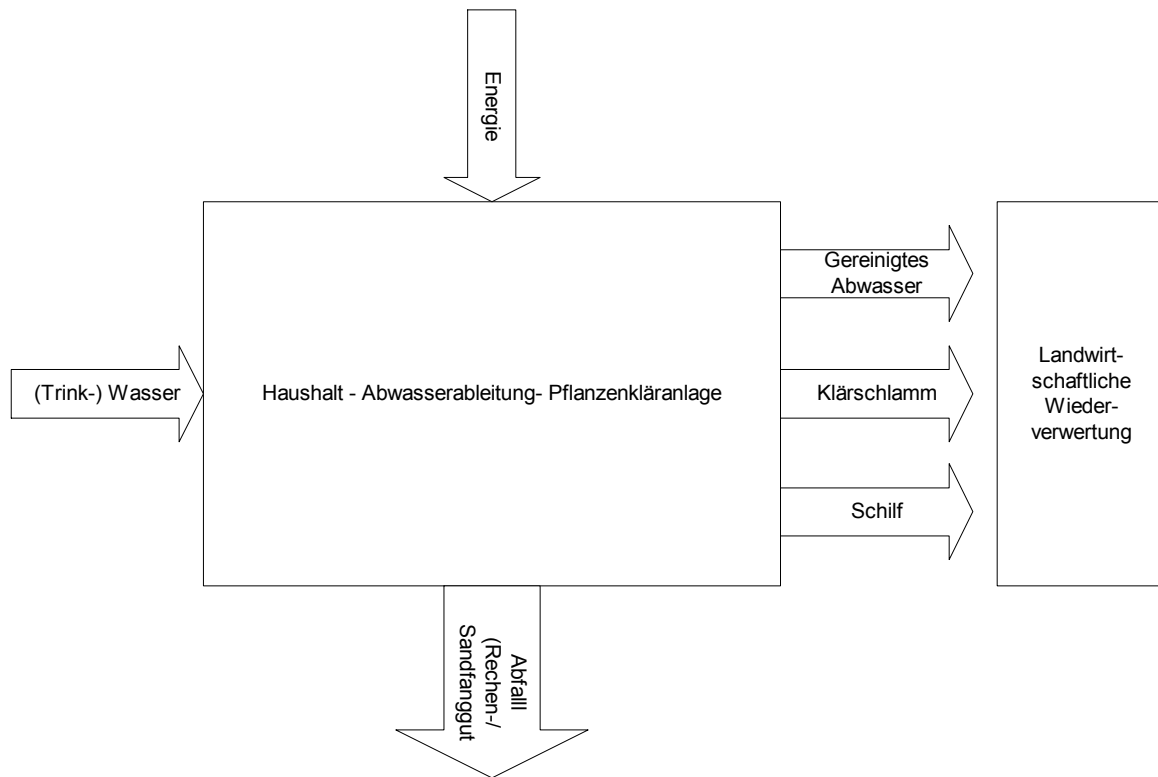
Die Pflanzenkläranlage überzeugt hinsichtlich Ihrer Fähigkeit zur Keimverminderung. Pathogene Keime und Wurmeier werden zuverlässig eliminiert, so dass eine nachgeschaltete Desinfektionsstufe nicht erforderlich ist. Die geforderte Reinigungsleistung in Bezug auf die Hygieneparameter wird somit voll erfüllt.

Hinsichtlich der Abbauleistung von organischen Substanzen lagen die Werte bei 82 – 85 %. SASMO-Klasse B wurde voll erfüllt, zeitweise auch Klasse A.

Schwermetalle sind grundsätzlich nicht abbaubar, sondern setzen sich im Schlamm ab oder werden im Boden zurückgehalten oder durchfließen die Anlage unverändert. Ein Teil der im Boden zurückgehaltenen Schwermetalle werden von den Pflanzen aufgenommen. [Mohamed (2004)]

Der Überwachungswert NH4-N wurde deutlich überschritten und selbst die Reinigungsklasse C nicht mehr erreicht. [Mohamed (2004)] vermutet hier einen Zusammenhang mit der hydraulischen Belastung der Beete. Daher ist anzunehmen, dass der Parameter NH4-N aufgrund der Anpassung an die spezifische BSB₅ Fracht von 55 g/l*d besser ausfallen wird. Die Neubemessung auf die in dieser Arbeit vereinbarten Standards führte zu einer Verdreifachung der Pflanzenbeetfläche aber gemessen an der hydraulischen Belastung nur zu einer Verdoppelung, d.h., die hydraulische Belastung wird aufgrund der größeren Beetfläche geringer ausfallen und damit wahrscheinlich den Parameter NH4-N entscheidend reduzieren, so dass die Klasse B erreicht werden kann.

8.6 Input / Output Modell der Stoffströme / Kosten- / Nutzenparameter der Abwasserwertung



(Trink-) Wasser

Da eine Schwemmkanalisation für diesen Kläranlagentyp vorgesehen ist, sind keine Trinkwassereinsparungen, die im Abwasserentsorgungssystem begründet liegen, zu erwarten.

Energie

Der Energieeinsatz wurde bereits in den Kostenkalkulationen berücksichtigt. kWh wurden ebenfalls in den vorangegangenen Kapiteln aufgelistet. Das Abwasserentsorgungssystem Pflanzenkläranlage verbraucht nur wenig Energie, kann sogar bei kleineren Anlagen und geografisch günstig gelegenen Standorten ohne Energie auskommen.

Rechen- und Sandfanggut

Der Abfall der Rechenanlage entspricht letztendlich auch dem Abfall der von den Haushalten hätte entsorgt werden müssen. D.h. für einen Vergleich der Verfahren ist dieser Punkt unerheblich. Das gesammelte Gut im Sandfang gehört allerdings theoretisch in die Stoffstrom- Betrachtung hinein, soll aber aus Vereinfachungsgründen nicht mit in die Abwasserwertungsrechnung einbezogen werden.

Schilf

Als Nebenprodukt der Pflanzenkläranlage entsteht auch Schilf, das u.U. in der Landwirtschaft wiederverwendet werden kann. Die dabei erwirtschafteten Beträge sind ebenfalls

theoretisch einzurechnen, aufgrund der geringen Höhe werden sie jedoch in Kosten-Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.

Gereinigtes Abwasser

Nährstoffwerte und Vergleichspreise wurden in der nachfolgenden Tabelle für verschiedene Ausbaugrößen dargestellt (Reinigungsleistung nach FAO/RNEA (2000)). Es wird ein Evaporationsverlust von 10 % angenommen (gereinigtes Abwasser = 80 l/(E*d).

Klärschlamm

Ein Schlammanfall von 0,015 m³/(EW*a) wird angenommen. Nährstoffwerte des Klärschlammes und Vergleichspreise können ebenfalls der Tabelle entnommen werden.

ABWASSERVERWERTUNG	5.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000
Abwasser l/(E*d)	80	80	80	80	80	80
Abwasser m ³ /d	400	891	1600	2400	4000	5600
Abwasser m ³ /a	146.000	325.054	584.000	876.000	1.460.000	2.044.000
Nährstoff N in t	4,4	9,8	17,5	26,3	43,8	61,3
Nährstoff P in t	1,5	3,3	5,8	8,8	14,6	20,4
Nährstoff K in t	4,4	9,8	17,5	26,3	43,8	61,3
Energieäquivalent von N in MWh	44	98	175	263	438	613
Gesamtwert (Nährstoffe Abw.)	7.580	16.877	30.321	45.482	75.803	106.124
Schlammanfall m ³ /a	75	167	300	450	750	1.050
Nährstoff N in t	1,5	3,3	5,9	8,8	14,6	20,5
Nährstoff P in t	0,6	1,4	2,6	3,9	6,5	9,0
Nährstoff K in t	0,1	0,3	0,5	0,7	1,2	1,7
Energieäquivalent von N in MWh	15	33	59	88	146	205
Gesamtwert (Nährstoffe KS)	1.863	4.148	7.452	11.178	18.630	26.082

8.7 Bewertung der Pflanzenkläranlage

Basierend auf den in Kap. 6.1 und 6.2 vorgegebenen Zielsetzungen soll nun die Erreichung dieser Ziele durch das in diesem Kapitel vorgestellte Abwasserreinigungs-/entsorgungssystem geprüft werden. In der nachfolgenden Übersicht Tab. 8-14 wird zusammenfassend der jeweilige Erfüllungsgrad kommentiert.

Tab. 8-14 Bewertung der Zielreichung / Effektivität des Verfahrens bezogen auf die Ziele

Zielsetzung	Bewertung	Zielerreichungsgrad
Nährstoffe werden weitgehend vollständig in das Ökosystem zurückgeführt – Kreislaufwirtschaft	Bietet sich für dezentrale Lösungen an. Abwasserwertung ist ohne Probleme möglich. Nährstoffe werden zwar reduziert, sind aber nicht so stark als wie bei einer Kläranlage mit Denitrifikation. In der Winterzeit sind intelligente Lösungen für die Abwasserwertung gefragt (siehe Kap. 8).	***
Wertvolles Trinkwasser wird eingespart	Keine Einsparung von Trinkwasser möglich, da Schwemmkanalisation als Abwasserleitung.	(*)
Rohstoffe werden eingespart	Rohstoffeinsparung findet nicht ausgeprägt statt.	**(*)
Sparsamer Energieverbrauch	Der Energiebedarf der Pflanzenkläranlage ist gering. Ein Energiesparer.	***(*)
Zuverlässiges und betriebssicheres System	In Syrien bereits in einem Pilotprojekt erfolgreich erprobt. Bei guter Wartung ein zuverlässiges System. Jedoch besteht stets die Gefahr der Kolmation. Die Betriebsführung ist nicht vollständig manipulierbar. Belastungstöße können Probleme bereiten, da auf extreme Schwankungen der Abwassermenge nicht einstellbar. Versalzungsgefahr in Trockenperioden. Minimale technische Ausrüstung notwendig, einfach zu bedienende Anlage. Nur wenig geschultes Personal ist erforderlich. Pflanzen und Bakterien sind empfindlich gegen harte Chemikalien. Die Bevölkerung muß entsprechend geschult werden, keine aggressiven Reinigungsmittel, Öle etc. über die Toiletten zu entsorgen.	**(*)
Soziale Akzeptanz ist gegeben, kaum Geruchsbildung	Die Pflanzenkläranlage hat einen großen Flächenbedarf. Dies könnte in manchen Ortschaften ein Problem darstellen. Auf der anderen Seite lässt sie sich sehr gut in das Landschaftsbild einpassen. Gute Akzeptanz bei der Bevölkerung, wie das Pilotprojekt in Syrien gezeigt hat [Mohamed (2004)]. Geringe Geruchsbelästigung. Moskito-Probleme konnten in Syrien nicht beobachtet werden.	***(*)
Sämtliche Hygieneforderungen werden erfüllt	Sehr gute Reduzierung der Keimzahlen und Wurmeier. Abwasser erfüllt ohne zusätzliche Nachbehandlung die Hygienekriterien.	****
Zufriedenstellende Reinigungsleistung	Die Reinigungsleistung kann in der kalten Jahreszeit in Syrien etwas herabgesetzt sein. Nötige Nährstoffelimination (Stickstoff) um in Bewässerungskategorie A hineinzukommen ist nicht ohne weiteres möglich.	***

- **** Ziel sehr gut erfüllt, hohe Effektivität
- *** Ziel gut erfüllt, gute Effektivität
- ** Ziel gerade noch erfüllt, geringe Effektivität
- * Ziel nicht erfüllt, nicht Effektiv bezogen auf das Ziel

9. Modellrechnung 3 : Urinseparations Dehydrationsstoiletten (Trockentoiletten mit Urinseparation)

9.1 Art und Herkunft des Datenmaterials

Auf eine syrische Studie in Bezug auf Kostendaten über Trockentoiletten mit Urinseparation konnte nicht zurückgegriffen werden. Preise für relevante Baumaterialien bzw. Bauarbeiten wurden in 2006 direkt vor Ort bei einschlägigen Baufirmen erfragt. Es handelt sich dabei um grobe Abschätzungen, die einen Durchschnittswert charakterisieren. Tatsächliche Kosten für einen konkreten Einzelfall können hiervon abweichend sein. Desweiteren dienten Kostendaten aus vergleichbaren Projekten anderer Länder als Orientierungswerte [GTZ, ecosan (2006)].

9.2 Aufbau und Beschreibung des Sanitärsystems Trockentoilette mit Urinseparation

Die Trockentoilette mit Urinseparation ist eine einfache Toilette zur getrennten Sammlung von Urin und Fäkalien. Sie ist unabhängig von Elektrizität und klassischer Abwasserentsorgung und kann in oder auch außerhalb der Wohnung installiert werden. Generell unterscheidet man Doppelkammer und Einzelkammer-Trockentoiletten. Die nachfolgenden Abb. 9-1 und 9-2 zeigen den grundsätzlichen Aufbau von Trockentoiletten mit Urinseparation.

Abb. 9-1 Aufbau einer Trockentoilette mit Urinseparation [GTZ, ecosan (2006)]

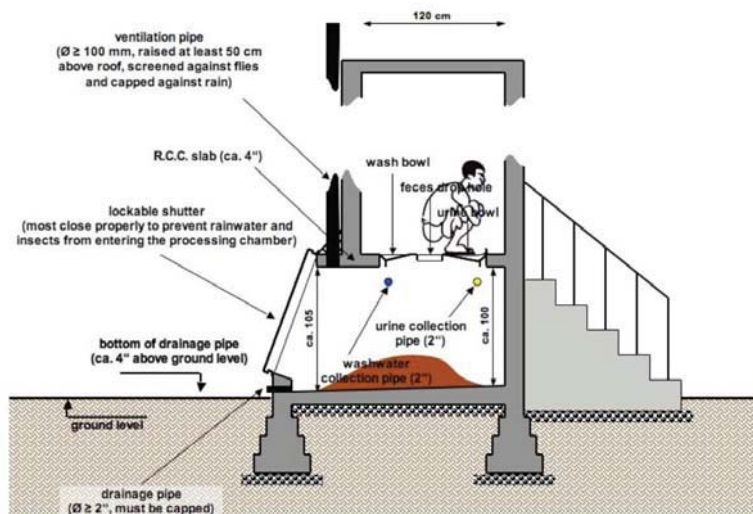
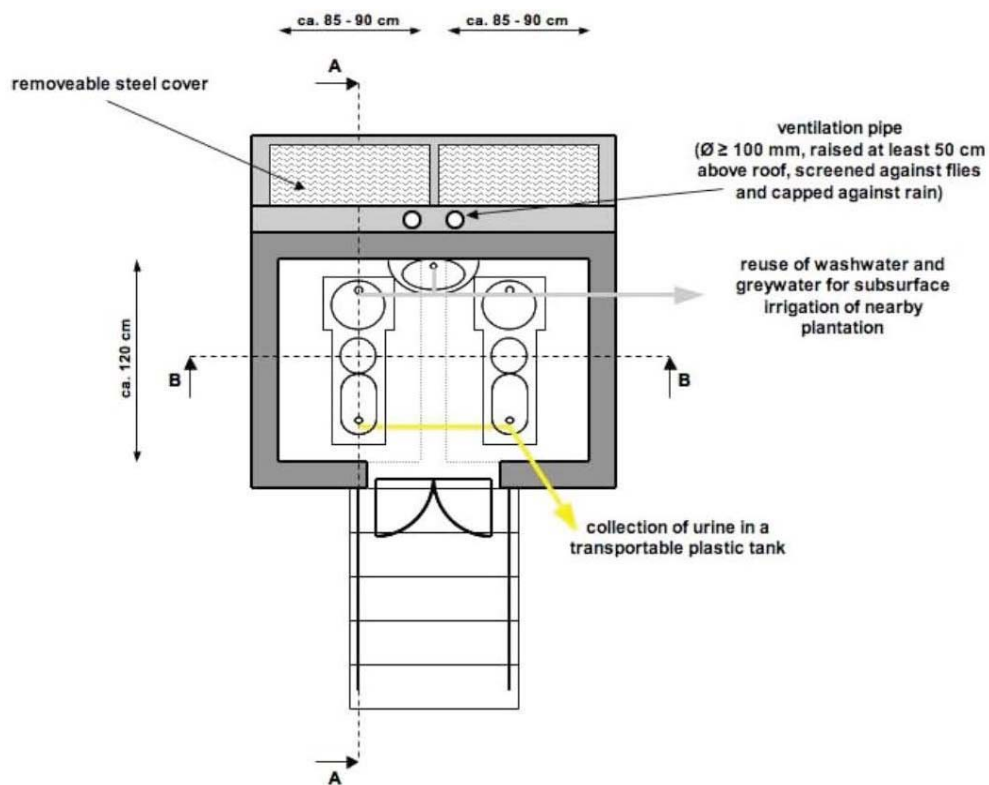
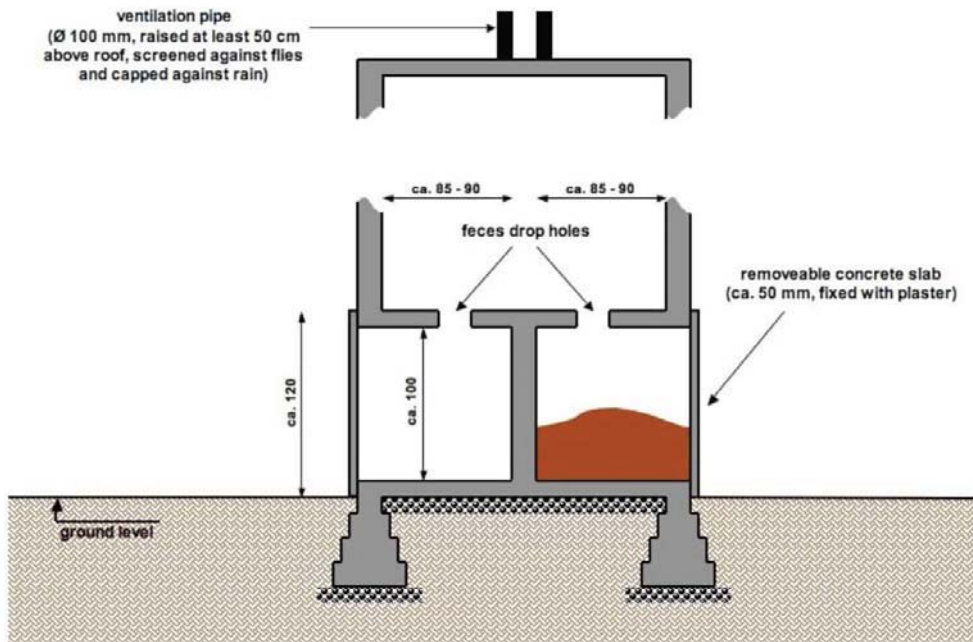


Abb. 9-2 Aufbau einer Trockentoilette mit Urinseparation [GTZ, ecosan (2006)]



Der Einbau des Toilettensystems kann auch nachträglich erfolgen. Die Umbauarbeiten hierzu sind wenig aufwendig. Wie in Syrien üblich, handelt es sich bei dem Toilettentyp um Steh-toiletten mit einem zusätzlichen Abfluss für die Nasshygiene. Das Waschwasser der Nasshygiene wird über ein Rohr dem Grauwasser zugeführt. Der Urin wird separat über ein Rohr in einen Urin-Speichertank im Garten oder Hof gesammelt.

Die Fäkalien werden in der Kammer unterhalb der eigentlichen Toilette gesammelt und dort getrocknet. Nach jedem Stuhlgang ist Trockenmaterial wie z.B. Kalk, Asche oder trockene Erde etc. den Fäkalien beizufügen. Das zugegebene Material erhöht neben dem Trockensubstanzgehalt auch die Luftzufuhr. Die Kammer ist darüber hinaus noch mit einem Lüftungsrohr über Dach auszustatten. Durch den Luftzug wird die Verdunstung und Trocknung der Feststoffe beschleunigt und ein Geruchsverschluß geschaffen, der den Toilettenraum auch während der Benutzung geruchsfrei hält.

Ein Feuchtigkeitsgehalt unter 25 % führt schnell zur Vernichtung von pathogenen Keimen und verhindert Fliegen- und Geruchsprobleme. Die Kammer ist so bemessen, dass eine Entleerung erst nach einem Jahr erforderlich wird. Dieser Zeitraum ist auch ungefähr nötig um die meisten Keime, Viren und Parasiten sicher abzutöten. Spulwürmer können u.U. sogar diese Prozedur überleben. Lagerung über diese Zeit hinaus, alkalische Behandlung oder Trocknung in der Sonne (UV-Bestrahlung) führt zu einer weiteren Reduzierung der Keime und Parasiten bis hin zur vollständigen Abtötung [GTZ, ecosan (2006)].

Ist eine Kammer voll, kann bei einer Zweikammertoilette direkt zur nächsten Kammer gewechselt werden. Dies hat den Vorteil, dass ohne weitere Zufuhr von Frischfäkalien eine Lagerung in der Kammer möglich ist (Hygiene). In Einkammertoiletten können separate, herausnehmbare Behälter etc. einen ähnlichen Komfort bieten, jedoch ist das Hygienierisiko etwas höher und eine häufigere Entleerung nötig. Bevorzugt wird aus diesen Gründen meist eine Zweikammer-Trockentoilette. Der Kostenunterschied ist nur unwesentlich [GTZ, ecosan (2006)]. In dieser Arbeit wird aufgrund der gesetzten Hygiene-Ziele, die Zweikammer-Trockentoilette als Modell ausgewählt.

Für die Aufnahme und Behandlung des Grauwassers sind Gemulchte Gräben vorgesehen, die um Büsche und Bäume angelegt werden. Das Grauwasser kann unbehandelt den Gräben zugeführt werden. Die Gräben selbst sind mit einem Gemisch aus organischem Mulch (Blätter, Baumrinde, Holzsnipsel etc.) und Steinen gefüllt. Die Bemessung erfolgt nach dem Pflanzenwasserverbrauch und ist daher auch abhängig von der vorherrschenden Evaporation. Für Syrien können Werte für die Flächenbelastung um $15 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ angenommen werden [Mosel (2006)]. Bei der Errichtung der Gräben ist darauf zu achten, dass eine gleichmäßige Verteilung des Grauwassers gegeben ist. Abb. 12-3 zeigt ein Mulchgraben-System aus Indien.

Abb. 9-3 Einfacher Gemulchter Graben [Foto: GTZ, Werner]



9.3 Aufbereitung der Kostendaten

Die im Kapitel 6.4 beschriebenen Schritte zur Aufbereitung des Datenmaterials wurden durchlaufen und folgende Anpassungen vorgenommen :

- Die meisten Richtpreise in dieser Studie wurden durch eine Befragung syrischer Bauunternehmer vor Ort ermittelt. Diese Preise sind zum Teil mit geringen Preisabschlägen (bis zu 20 %) versehen worden, da der Mengenaspekt (Anzahl der umzubauenden Toiletten) bei der Kalkulation der Preise durch den Bauunternehmer nicht berücksichtigt wurde.
- Bei einigen Kosten wurden die in den Studien [Arabtech (2006) und KfW (2006)] verwendeten Ansätze herangezogen, um mit möglichst gleicher Kostenbasis zu arbeiten (Fahrzeuge, Reservoir).
- Den Kostensätzen wurde wie unter Kap. 6.5.1 aufgeführt, 15 % Planungskosten und 15 % Kosten für Unwägbarkeiten zugeschlagen. Planungskosten und Grundstückskosten wurden unter Nebenkosten zusammengefasst.
- Grundstückskosten wurden wie in den Modellen zuvor (Kap. 7 und 8) mit € 20.635 pro ha angesetzt.

9.4 Kostenbetrachtung der Abwasserbehandlung

Für die Abschätzung der Anzahl der bestehenden Haushalte, der Personen pro Haushalt, der Anzahl der Toiletten diente die Sozialstudie aus [Arabtech (2006)]. Ebenso wurde auf Basis der in diesen Studien prognostizierten Bevölkerungsentwicklung eine Abschätzung für die Anzahl der neu entstehenden Haushalte vorgenommen.

Als Ausgangsbasis der Kostenbetrachtung wurde dort eine Einwohnerzahl von 8.500 (Jahr 2010) bzw. 11.153 (Jahr 2025) angenommen. Ausgehend von dieser Berechnung erfolgte die Ableitung für die Kosten anderer Einwohnergrößen.

Wie die Sozialstudie [Arabtech (2006)] ausführt, leben im Durchschnitt 6 Personen pro Haushalt. In 62 % der Häuser lebt nur eine Familie (=Haushalt), 18 % der Häuser werden von zwei Familien, die restlichen 20 % von mehr als zwei Familien bewohnt. Gemäß Kap. 2.4 „produziert“ ein 6 Personen Haushalt ca. 3.300 liter Urin und ca. 350 kg Fäkalien pro Jahr, die zur Verwertung anstehen.

Basierend auf diesen Daten ist bei 1420 Haushalten (8500 Haushalte dividiert durch 6 Personen pro Haushalt) ein Sanitärsystem-Umbau erforderlich, 440 neu entstehende Haushalte können direkt das neue Trennsystem einbauen. Es wird angenommen, dass für 20 % (= 284 Haushalte) der umzubauenden Sanitärsysteme eine Außenlösung (Zweikammer-Toilette im Garten) angestrebt bzw. aus baulichen Gründen erforderlich wird.

9.4.1 Investitionskosten

Tabelle 9-1 gibt eine Aufstellung der in Ansatz gebrachten Investitionskosten wieder. Hygieneziele und sich daraus ergebende Vorgaben (siehe Kap. 2.4) sowie die Grundsätze der Guten Fachlichen Praxis beim Düngen (siehe Kap. 2.4) wurden berücksichtigt.

Tab. 9-1 Aufstellung der Investitionskosten für Trockentoiletten mit Urinseparation für 11.132 EW

Pos.	Beschreibung	Mengen, Einzelpreise, Abmessungen
1.	Sanitärinstallationen inkl. Leitungsverlegung für Urinseparation und Nasshygiene	
1.1	Umbau einer bestehenden Toilettenanlage	Betroffene Haushalte : 1136 Richtpreis pro Haushalt : 150 € ^(a)
1.2	Bau einer neuen Toilettenanlage im Garten etc.	Betroffene Haushalte : 284 Richtpreis pro Haushalt : 250 € ^(a)
1.3	Mehrkosten für eine Trockentoilette mit Urinseparation bei einem Neubau	Betroffene Haushalte : 440 Richtpreis pro Haushalt : 40 € ^(a)
2.	Sanitärinstallationen für Grauwasser inkl. Leitungsverlegung bis zu den gemulchten Gräben; inkl. Anlage der gemulchten Gräben (die Gräben befinden sich in einem Umkreis von 100 m).	Betroffene Haushalte : 1860 Richtkosten pro Haushalt : 100 € ^(b) Die Gräben befinden sich in einem Umkreis von 100 m. Für einen Haushalt werden ca. 25 m ² gemulchter Gräben benötigt. Instandhaltungskosten werden mit 5 % angesetzt.
3.	Urin-Speichertanks für die Urinsammlung beim Verursacher	Alle 2 Monate sollen die Speichertanks durch einen Abholservice entleert werden. Haushalte 1000 l Tank für 1 Haushalt (30 %) → 558 → 558 Tanks 1500 l Tank für 2 Haushalte (40 %) → 744 → 372 Tanks 2000 l Tank für 3 Haushalte (20 %) → 372 → 124 Tanks 3000 l Tank für 5 Haushalte (10 %) → 186 → 38 Tanks Tankkosten pro Haushalt : 57 € ^(c) (Einzelpreise : 1000 l = 75 €; 1500 l = 100 €; 2000 l = 150 €; 3000 l = 200 €) Tankeinbau (Anlieferung, Erdaushub etc.) Pauschal pro Haushalt : 8 € ^(e)
4.	Zwischenspeicherung von Urin in Sammelreservoirs vor Übergabe an den Landwirt	Speicherung für mind. 6 Monate zwecks Entkeimung sowie Berücksichtigung der guten Düngepraxis (keine Düngung während der Wintermonate). Speichervorrat für 7-8 Monate für gezielte Düngung. 15 Stck. Reservoirs der Größe von 250 m ³ , Abmessungen ca. 12 x 7 x 3 m Richtkosten pro Reservoir : 16.000 € ^(d)
5.	Nachkompostierung der Fäkalien vor Übergabe an den Landwirt	Nachkompostierung, Sonnentrocknung für mind. 3 Monate. Flächenbedarf : ca. 180 m ² , 4-10 Gräben, Richtkosten Gesamt : 2.500 € ^(d)
6	Fahrzeug für das Personal	1 Stck. Fahrzeug mit 5er Kabine und offener Ladefläche (Pick-up) Richtkosten pro Fahrzeug : 30.000 € ^(e)
7	Bürraum	Richtkosten für einen Bürraum : 10.000 € ^(f)
8	Grundstückskosten	Für Urin-Speicherreservoirs, Nachkompostierung und Gemulchte Gräben

		Toilettensystem und Urin-Speichertank zählen nicht zu den Grundstückskosten, sondern sind privat zu stellen.
		Richtkosten pro ha : 20.635 € ^(e)

(a) Preise syrischer Bauunternehmer aus 2006.

(b) Preise syrischer Bauunternehmer aus 2006 (Sanitär) plus Preisschätzung für Gemulchte Gräben [GTZ, ecosan (2006)].

(c) Preise syrischer Händler; Tankkosten pro Haushalt setzt sich aus den jeweiligen Einzelpreisen zusammen.

(d) Planung Reservoir und Nachkompostierung [(Oldenburg (2003), Rodeco, GTZ, Aldar (2003)); Kostenansätze Studie [KfW (2006)]

(e) Kostenansätze Studie [KfW (2006)]

(f) Abschätzung

Unter Berücksichtigung der in Tab. 9-1 vorgestellten Kostendaten ergeben sich die in Tab. 9-2 dargestellten Gesamtkosten.

Tab. 9-2 Gesamtkosten des Abwassersystems „Trockentoilette mit Urinseparation“ mit und ohne Nebenkosten (Planung, Grundstück)

EW in TSD	5	10	11	20	30	50	70	100
ENDBETRAG I								
(ohne Nebenkosten) in TSD	463	881	975	1.750	2.614	4.319	6.053	8.621
€/ EW (I)	93	88	88	88	87	86	86	86
ENDBETRAG II								
(Gesamt, inkl. Nebenkosten) in TSD	584	1.116	1.237	2.220	3.317	5.485	7.686	10.950
€/ EW (II)	117	112	111	111	111	110	110	110

Die Gesamtkosten korrelieren vollständig mit der Anzahl der Haushalte und damit mit dem Einwohnerwert. Tab. 9-3 gibt Aufschluss über die prozentuale Verteilung der Einzelnen Kostenblöcke. Wie zu ersehen ist, stellt die Urinspeicherung (Tanks, Reservoir) mit ca. 42 % den größten Kostenfaktor dar. Die Sanitärinstallationen im Haushalt für die Trockentoiletten folgen mit ca. 30 % der Kosten.

Tab. 9-3 Prozentuale Aufteilung der Investitionskosten des Abwassersystems „Trockentoilette mit Urinseparation“

	EW 5.000	EW > 10.000
Sanitärinstallationen im Haushalt	28,9%	30,7%
Sanitärinstallationen Grauwasser/Grauwasserb.	20,7%	22,0%
Urin-Speichertanks	40,2%	42,8%
Nachkompostierung	0,3%	0,3%
Gebäude und Ausrüstung	9,9%	4,2%
Gesamt	100,0%	100,0%

9.4.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten sind für die reine Behandlung des Urins und der Fäkalien gering. Es wird angenommen, dass zwei Personen als ständige Ansprechpartner für Fragen für die Kommune zur Verfügung stehen. Diese Personen führen Schulungen durch, Inspizieren regelmäßig die Speichertanks, die gemulchten Gräben und die Nachkompostierung. Besuchen Wohnhäuser und weisen auf den korrekten Umgang mit einer Trockentoilette mit Urinseparation hin und sorgen für eine einfache Beschaffung der Hilfsstoffe (Kalk, Asche, Alkalien etc.). Desweiteren beaufsichtigen sie fünf weitere Personen die jeweils für den Empfang und die korrekte Einleitung des Urins in das Reservoir bzw. der Fäkalien ins

Trockenbeet zuständig sind, sowie für die Pflege der Mulchgräben. Ein Fahrzeug sollte für diese Personengruppe bereitgestellt werden (siehe Investitionskosten). Für größere Einwohnerwerte ist der Fahrzeug- und Personalbedarf entsprechend angepasst worden.

Tab. 9-4 Personalkosten pro Jahr

Personalkosten p.a.	€/a	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
		5.000	10.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000	100.000
Direktor, Betriebsleiter	9000	0	0	0	0	0	0	9000	9000
Ingenieur	6400	0	0	0	0	0	0	0	0
Aufsichtsperson	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Chemiker	4000	0	0	0	0	0	0	0	0
Techniker	3500	3500	3500	3500	3500	7000	10500	14000	17500
Labortechniker	3500	0	0	0	0	3500	3500	7000	7000
Buchhalter	2610	0	0	0	0	0	0	2610	2610
Administration/Sekretariat	1885	0	0	0	0	0	1885	1885	3770
Fahrer	1885	0	0	0	0	1885	1885	3770	7540
Hilfspersonal	1700	5100	8500	8500	10200	11900	15300	18700	25500
Gesamt		12600	16000	16000	17700	28285	37070	60965	76920
Personalkosten €/(E*a)		2,52	1,60	1,44	0,89	0,94	0,74	0,87	0,77

Zu den bautechnischen Instandhaltungskosten zählen die Pos. 1 sowie die Pos. 3 bis 5 aus Tab. 9-1. Die Gemulchten Gräben aus Pos. 2 der Tab. 9-1 bedürfen einer intensiveren Pflege und müssen auch des Öfteren ausgetauscht werden, daher werden 5 % Instandhaltungskosten verrechnet. Pos. 6 zählt zu Kfz und Ausrüstung und wird gemäß Kap. 6.6.2. ebenfalls mit 5 % verrechnet. Die sonstigen Kosten setzen sich zusammen aus Büromaterial, Werkzeuge, Dienstkleidung und Benzinkosten für ein Fahrzeug etc.. Die Energiekosten fallen in erster Linie für das Büro an und sind damit sehr gering.

Tab. 9-5 Betriebskostenübersicht

Betriebskosten p.a.		EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
		5000	10000	11132	20000	30000	50000	70000	100000
Energiekosten	€/(EW*a)	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,003	0,003	0,002
Instandhaltungskosten	€/(EW*a)	1,88	1,68	1,66	1,68	1,64	1,62	1,62	1,61
Sonstige Kosten	€/(EW*a)	0,59	0,41	0,38	0,27	0,28	0,24	0,26	0,24

Tab. 9-6 Prozentuale Aufteilung der Betriebskosten

Betriebskosten p.a.	EW 5.000	EW 10.000 -30.000	EW > 40.000
Energiekosten	0,3%	0,1 - 0,2 %	0,05 %
Instandhaltungskosten	37,6%	45 - 57 %	58 - 62 %
Personalkosten	50,3%	32 - 43 %	28 - 32 %
Sonstige Kosten	11,8%	9 -11 %	9%

9.4.3 Projektkostenbarwerte / Jahreskosten

Zur Errechnung der Barwerte und der Jahreskosten wurde eine finanzmathematische Aufbereitung der Kostendaten vorgenommen und für zwei Ausbaugrößen im Detail vorgestellt (siehe nachfolgende Seite).

Tab. 9-7 Jahreskosten und Projektbarwerte für zwei unterschiedliche Einwohnerwerte für das Abwassersystem „Trockentoilette mit Urinseparation“

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 3 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$			
für					
Trockentoiletten mit Urinseparation					
Einwohnerwert (EW) 11153					
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102
-2. J. Grundstück	115.305 €	1,06090	122.327 €	122.327 €	6.241 €
-1. J. 50 % der Investitionskosten	561.024 €	1,03000	577.855 €	577.855 €	29.482 €
0. J. 50 % der Investitionskosten	561.024 €	1,00000	561.024 €	561.024 €	28.623 €
Gesamtinvestitionskosten	1.237.354 €			1.261.207 €	64.347 €
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.				DFAKE	
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	36.225 €		36.225 €	0,74409	26.955 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	36.225 €		36.225 €	0,55368	20.057 €
Gesamtreinvestitionskosten	72.450 €				47.012 €
Betriebskosten nach Inbetriebn.				--> KFAKR DFAKRP	<-- DFAKR 19,6004
Energiekosten	76 €		76 €	25,8818	1.968 €
Instandhaltungskosten	18.465 €		18.465 €		361.920 €
Personalkosten	16.000 €		16.000 €		313.606 €
Sonstige Kosten	4.200 €		4.200 €		82.322 €
Gesamtbetriebskosten	38.741 €				759.817 €
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt					2.068.035 €
					105.511 €

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 3 Jahre Bauphase Zinssatz $i = 3\%$			
für					
Trockentoiletten mit Urinseparation					
Einwohnerwert (EW) 20.000					
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs- zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102
-2. J. Grundstück	207.160 €	1,06090	219.776 €	219.776 €	11.213 €
-1. J. 50 % der Investitionskosten	1.006.716 €	1,03000	1.036.917 €	1.036.917 €	52.904 €
0. J. 50 % der Investitionskosten	1.006.716 €	1,00000	1.006.716 €	1.006.716 €	51.363 €
Gesamtinvestitionskosten	2.220.591 €			2.263.409 €	115.479 €
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.				DFAKE	
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	72.450 €		72.450 €	0,74409	53.909 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	72.450 €		72.450 €	0,55368	40.114 €
Gesamtreinvestitionskosten	144.900 €				94.023 €
Betriebskosten nach Inbetriebn.				--> KFAKR DFAKRP	<-- DFAKR 19,6004
Energiekosten	76 €		76 €	25,8818	1.968 €
Instandhaltungskosten	33.525 €		33.525 €		657.109 €
Personalkosten	17.700 €		17.700 €		346.927 €
Sonstige Kosten	5.337 €		5.337 €		104.600 €
Gesamtbetriebskosten	56.638 €				1.110.605 €
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt					3.468.037 €
					176.939 €

Tab.: 9-8 Prozentuale Aufteilung der Jahreskosten für das Abwassersystem „Trockentoilette mit Urinseparation“

Jahreskosten	EW 5.000	EW 10.000 -30.000	EW > 40.000
Investitionskosten-Jahreskosten	52,5%	59 - 65 %	66- 67 %
Reinvestitionskosten-Jahreskosten	4,1%	1,8 - 2,5 %	1,8 - 2,4 %
Betriebskosten-Jahreskosten	43,3%	32 - 38 %	30 - 31 %

Reinvestitionskosten spielen bei dem Abwassermodell „Trockentoilette mit Urinseparation“ eine untergeordnete Rolle. Die Investitionskosten nehmen mit steigender Einwohnerzahl prozentual zu, die Betriebskosten prozentual ab, wobei die Investitionskosten stets dominieren.

9.5 Kostenbetrachtung der Abwasserableitung

Weder eine klassische Ortskanalisation noch Transportkanäle werden bei dem Abwassersystem Trockentoilette mit Urinseparation benötigt. Das Grauwasser wird in Haushaltsnähe einem Gemulchten Graben zugeführt, die Entsorgung der Urinspeicher und der Fäkalien wird über einen Abholservice wahrgenommen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass wertvolles (Trink-) Wasser gespart wird, da die Trockentoilette kein Wasser benötigt und man gegenüber einer Spültoilette ca. 30 Liter pro Einwohner am Tag sparen kann (bei einem angenommenen Verbrauch von regulär 88 l/(E*d) [siehe auch Kap. 4.4]).

9.5.1 Investitionskosten

Nachfolgend werden die Investitions- und Betriebskosten für die Entsorgung der Exkrememente dargestellt.

Tab. 9-9 Aufstellung der Investitionskosten für die Abholung des Urins und der Fäkalien

Pos.	Beschreibung	Mengen, Einzelpreise, Abmessungen
1.	Service für die Entleerung der Urintanks	
1.1	Fahrzeug mit Tankaufbau inkl. Pumpsystem für die Abholung des Urins beim Verursacher und Transport zur Zwischenspeicherstelle (Reservoir).	2 Stck. LKW mit 5000 liter Tank inkl. Pumpsystem Annahmen : * 1092 Tanks müssen alle 2 Monate entleert werden; * ca. 1.000.000 l Urin müssen gepumpt werden * ca. 15 min. pro Tank zum entleeren und befüllen; * ca. 5 min. Fahrzeit von Tank zu Tank * ca. 20 min Fahrzeit zum Reservoir (Hin- u. Zurück) Stückpreis : 50.000 € ^(a)
1.2	Funksprechnet VHF/FM	Setpreis für 3 Einheiten : 4.500 € ^(b)
2.	Service für den Abtransport der Fäkalien aus den Trockentoiletten	
2.1	Fahrzeug mit Ladefläche für die Abholung der Fäkalien beim Verursacher und Transport zur Nachkompostierungsstelle	1 Stck. Klein-LKW mit einer max. Nutzlast von 1,5 to Annahmen :

		* 1860 Haushalte müssen 1x im Jahr angefahren werden * ca. 300 kg Fäkalien sind pro Haushalt abzuholen * ca. 20 min. pro Haushalt für Abholung und Entleerung * ca. 5 min. Fahrzeit von Haushalt zu Haushalt * ca. 20 min. Fahrzeit zum Reservoir (Hin- u. Zurück)
		Stückpreis : 30.000 € ^(a)
2.2	Funksprechnetzt VHF/FM für 1 Einheit	Setpreis für 1 Einheit : 1.500 € ^(b)

(a) Kostenansätze Studie [KfW (2006)]

(b) Deutscher Preisansatz

Die Investitionskosten pro Einwohner für den Abholservice sind in der nachfolgenden Tab. 9-10 aufgeführt.

Tab. 9-10 Gesamtkosten des Abholservices „Trockentoilette mit Urinseparation“ mit und ohne Nebenkosten

EW in TSD	5	10	11	20	30	50	70	100
ENDBETRAG I								
(ohne Nebenkosten) in TSD	149	156	156	251	370	508	834	1.107
€/EW (I)	30	16	14	13	12	10	12	11
ENDBETRAG II								
(Gesamt, inkl. Nebenkosten) in TSD	171	179	179	289	425	772	959	1.273
€/EW (II)	34	18	16	14	14	15	14	13

Die prozentuale Aufteilung der Investitionskosten stellt sich so dar, dass ca. 77 % der Investitionskosten für die Urinabholung zu veranschlagen sind und ca. 20 % der Investitionskosten für die Fäkalienabholung. 3 % nimmt die Kommunikationstechnik ein (Funkgeräte).

9.5.2 Betriebskosten

Für den Abholservice wird angenommen, dass insgesamt 8 Personen benötigt werden. Drei Teams sind zu bilden. Diese Personen übernehmen neben dem reinen Abholservice auch die Registrierung des in Empfang genommenen Düngers (Urin bzw. Fäkalien), um so die Basis für eine Bezahlung des Düngers zu legen. Betriebsstoffe werden mit EUR 2.000 p.a. angesetzt und unter Sonstige Kosten zugeschlagen.

Tab. 9-11 Betriebskostenübersicht

Betriebskosten p.a.		EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW	EW
Abholservice		5000	10000	11132	20000	30000	50000	70000	100000
Energie	€/(EW*a)	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,003	0,003	0,002
Instandhaltung	€/(EW*a)	1,72	0,90	0,81	0,72	0,71	0,67	0,69	0,64
Personal	€/(EW*a)	2,15	1,43	1,29	1,28	1,09	0,94	0,93	0,90
Sonstiges	€/(EW*a)	0,61	0,47	0,44	0,43	0,40	0,37	0,37	0,36

9.5.3 Projektkostenbarwerte / Jahreskosten

Zur Errechnung der Barwerte und der Jahreskosten wurde eine finanzmathematische Aufbereitung der Kostendaten vorgenommen und für zwei Ausbaugrößen in der nachfolgenden Tabelle 9-12 im Detail vorgestellt.

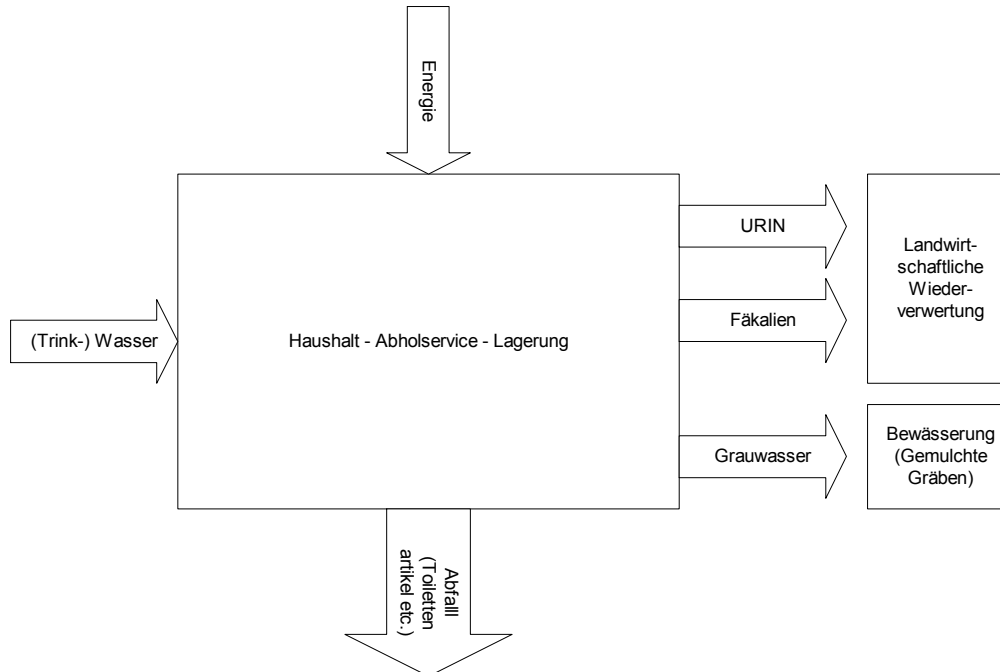
Tab. 9-12 Jahreskosten und Projektbarwerte für zwei unterschiedliche Einwohnerwerte für den Abholservice des Abwassermodells „Trockentoilette mit Urinseparation“

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 3 Jahre Bauphase Zinssatz i = 3 %			
für					
Trockentoiletten mit Urinseparation / ABHOLSERVICE					
Einwohnerwert (EW)	11153				
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs-zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102
0. J. Investitionskosten	179.860 €	1,00000	179.860 €	179.860 €	9.176 €
Gesamtinvestitionskosten	179.860 €			179.860 €	9.176 €
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.		DFAKE			
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	164.220 €		164.220 €	0,74409	122.194 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	164.220 €		164.220 €	0,55368	90.925 €
Gesamtinvestitionskosten	328.440 €			213.120 €	10.873 €
Betriebskosten nach Inbetriebn.		DFAKRP			
Energiekosten	76 €		76 €	25,8818	1.968 €
Instandhaltungskosten	8.993 €		8.993 €		176.266 €
Personalkosten	14.340 €		14.340 €		281.070 €
Sonstige Kosten	4.868 €		4.868 €		95.415 €
Gesamtbetriebskosten	28.277 €			554.719 €	28.301 €
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				947.699 €	48.351 €

Jahreskosten / Projektkostenbarwert		Untersuchungszeitraum 30 Jahre plus 3 Jahre Bauphase Zinssatz i = 3 %			
für					
Trockentoiletten mit Urinseparation / ABHOLSERVICE					
Einwohnerwert (EW)	20.000				
Investitionskosten		AFAKE	Bezugs-zeitpunkt	Barwert --> KFAKR =	Jahreskosten 0,05102
0. J. Investitionskosten	289.628 €	1,00000	289.628 €	289.628 €	14.777 €
Gesamtinvestitionskosten	289.628 €			289.628 €	14.777 €
Reinvestitionskosten nach Inbetriebn.		DFAKE			
10. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	264.443 €		264.443 €	0,74409	196.769 €
20. J. Fahrzeuge, Ausrüstung ; n=10	264.443 €		264.443 €	0,55368	146.417 €
Gesamtinvestitionskosten	528.885 €			343.186 €	17.509 €
Betriebskosten nach Inbetriebn.		DFAKRP			
Energiekosten	76 €		76 €	25,8818	1.968 €
Instandhaltungskosten	14.481 €		14.481 €		283.841 €
Personalkosten	25.510 €		25.510 €		500.006 €
Sonstige Kosten	8.695 €		8.695 €		170.430 €
Gesamtbetriebskosten	48.763 €			956.245 €	48.787 €
Projektkostenbarwert / Jahreskosten insgesamt				1.589.059 €	81.073 €

9.6 Input / Output Modell der Stoffströme / Kosten- / Nutzenparameter der Abwasserverwertung

Abb. 9-4 Input-Output Modell für das Abwassersystem „Trockentoilette mit Urinseparation“



(Trink-) Wasser

Die Trinkwassereinsparung bei einem Abwasseranfall von 88 l/(E*d) wird gemäß Kap. 4.4.4, Tabelle xxx ca. zwischen 4 und 30 Liter pro Einwohner und Tag liegen. Tabelle xxx gibt Aufschluß über die Gesamtmengen und die eingesparten Kosten auf Basis der Trinkwassergebühren in Syrien.

Energie

Der Energieeinsatz wurde bereits in den Kostenkalkulationen berücksichtigt. kWh wurden ebenfalls in den vorangegangenen Kapiteln aufgelistet. Das Abwasserentsorgungssystem Trockentoilette mit Urinseparation ist ein vorzüglicher Energiesparer. Für den Reinigungsprozeß muss so gut wie keine Energie aufgewendet werden.

Abfall

Der Abfall der hier anfallen kann, ist ungefähr vergleichbar mit dem Abfall den man auch in der Rechen- und Siebanlage der Kläranlage wiederfindet. Da diese Arbeit einen Vergleich zwischen den verschiedenen Verfahren anstrebt, wird dieser Punkt nicht näher betrachtet.

Urin

Nährstoffwerte und Vergleichspreise können der Tabelle xxx entnommen werden. Es ist ersichtlich, dass eine erhebliche Menge an Dünger eingespart werden könnte und so Phosphor und Kalium Reserven geschont würden.

Fäkalien

Die getrockneten Fäkalien können als Bodenverbesserer eingesetzt werden oder einer weiteren Kompostierung unterzogen werden. Die Jahresproduktion einer Person beträgt ca. an Fäkalkompost ca. 50 kg. Die Nährstoffanteile werden gemäß Kap. 2.4.3 angenommen.

(jedoch bezüglich des Stickstoffs aufgrund der langen Lagerzeit um 30 % reduziert, siehe Kap.2)).

Grauwasser

Grauwasser : 21.900 Liter (siehe Kap. 4)

→ Gemulchte Gräben, eventuell für Obstbäume etc., zum Teil Grundwasserauffüllung

Tabe. 9-13

URINVERWERTUNG	5.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000
Urinmenge (550 l/EW)	2.750	6.123	11.000	16.500	27.500	38.500
Gesamtwert (Nährstoffe)	16.253	36.185	65.010	97.515	162.525	227.535
Nährstoff N	37	81	146	219	365	511
Nährstoff P	3	7	12	18	30	42
Nährstoff K	8	18	32	48	80	112
Energieäquivalent von N	365	813	1460	2190	3650	5110
Benötigte Düngefläche (P-bezogen)	75	168	301	452	753	1055
Benötigte Düngefläche (N-bezogen)	167	371	667	1000	1667	2333
Fäkalien	5.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000
Fäkalienmenge in t	250	557	1.000	1.500	2.500	3.500
Nährstoff N	1,9	4,3	7,7	11,6	19,3	27,0
Nährstoff P	0,9	2,0	3,6	5,4	9,0	12,6
Nährstoff K	1,7	3,7	6,6	9,9	16,5	23,1
Energieäquivalent von N	19	43	77	116	193	270
TRINKWASSER	5.000	11.132	20.000	30.000	50.000	70.000
Trinkwassereinsparung 4 l/(E*d)	20	45	80	120	200	280
Trinkwassereinsparung 30 l/(E*d)	150	334	600	900	1.500	2.100
Trinkwassereinsparung 4l	1,2	2,7	4,8	7,2	12	17
Trinkwassereinsparung 30l	9,0	20,0	36,0	54,0	90	126
Trinkwassereinsparung 4l	6,2	13,8	24,8	37,2	62	87
Trinkwassereinsparung 30l	47	104	186	279	465	651

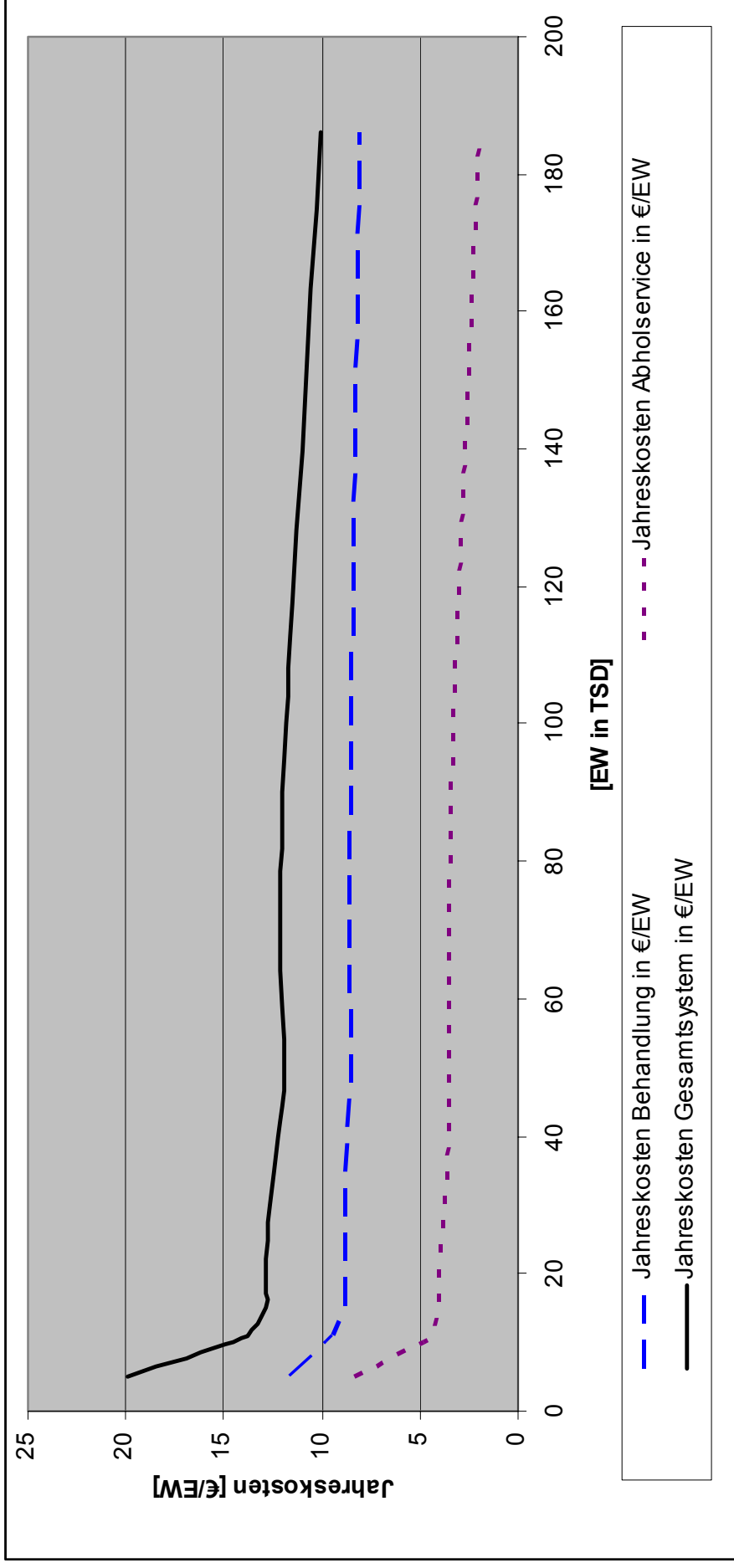
Zu berücksichtigen sind noch Kosten für ein Spezialaufbringergerät für Urin (Schleppschlauchverfahren) mind. 1-2 Geräte werden pro 10.000 EW benötigt. Kosten ca. EUR 15.000 pro Stck. (ca. Preis 2006, deutscher Handel). Eine entsprechende Zugmaschine (Traktor) muss ebenfalls vorhanden sein.

mind. 1 Person für Ausgabe an Bauern, Abrechnung, Schulung über richtige Handhabe etc.

9.7 Gesamtbetrachtung und Bewertung

9.7.1 Gesamtbetrachtung der Jahreskosten

Abb. 9-5 Gesamtkosten für das Abwasserentsorgungssystem „Trockentoilette mit Urinseparation“



JAHRESKOSTEN	5.000	10.000	11.132	15.000	20.000	30.000	40.000	50.000
Behandlung/Reinigung (€)	57.902	97.475	105.511	132.969	176.939	264.698	348.362	423.651
Abholservice (€)	41.667	48.148	48.352	60.044	81.074	113.571	141.696	174.093
Gesamtsystem Trockentoilette (€)	99.568	145.624	153.863	193.013	258.013	378.269	490.058	597.744

9.7.2 Bewertung der Trockentoilette mit Urinseparation

Basierend auf den in Kap. 6.1 und 6.2 vorgegebenen Zielsetzungen soll nun die Erreichung dieser Ziele durch das in diesem Kapitel vorgestellte Abwasserreinigungs-/entsorgungssystem geprüft werden. In der nachfolgenden Übersicht Tab. 9-14 wird zusammenfassend der jeweilige Erfüllungsgrad kommentiert.

Tab. 9-14 Bewertung der Zielreichung / Effektivität des Verfahrens bezogen auf die Ziele

Zielsetzung	Bewertung	Zielerreichungsgrad
Nährstoffe werden weitgehend vollständig in das Ökosystem zurückgeführt – Kreislaufwirtschaft	Nährstoffe werden weitgehend wieder in das Ökosystem eingebracht. Durch die nötigen langen Speicherzeiten des Urins und der Fäkalien kann bei ausreichender Bemessung des Speichervolumens der Nährstoffaustrag sehr gut gesteuert werden. D.h. das System hat keine Probleme mit der Vegetationsruhe.	****
Wertvolles Trinkwasser wird eingespart	Sehr gutes System um (Trink-) Wasser zu sparen. Es wird kein Wasser benötigt um die Exkremete wegzuspülen. Keine Wasserverschmutzung.	****
Rohstoffe werden eingespart	Fast alle Nährstoffe bleiben erhalten.	****
Sparsamer Energieverbrauch	Ein Energiesparer ersten Ranges. Energie wird in Form von Benzin für den Abholservice und die Betreuung der Benutzer benötigt.	****
Zuverlässiges und betriebssicheres System	Stark in der Verantwortung des Benutzers, dies birgt ein gewisses Risiko. Einfaches, robustes System, keine besonderen Fachkenntnisse werden vorausgesetzt, sogar der Toilettenbau könnte in Eigenregie erfolgen. Eingesetzte Materialien können lokal hergestellt werden.	**(*)
Soziale Akzeptanz ist gegeben, kaum Geruchsbildung	Kaum Geruchsbildung, durch Abzugsrohr und vorschriftsmäßiger Behandlung. Kann auf Ablehnung in islam. Ländern stoßen, da der Umgang mit Fäkalien als „unrein“ gilt. Generell ist der Benutzungskomfort etwas geringer im Vergleich zur Spültoilette.	**(*)
Sämtliche Hygieneforderungen werden erfüllt	Die Endprodukte (Urin, Fäkalien) sind bei richtiger Behandlung und Lagerung weitgehend keimfrei. Fliegenausbreitung bei richtiger Handhabung (streuen von Kalk, Asche etc.) gering. Netz am Abzugsrohr anbringen. Schulungen der Bevölkerung werden nötig sein.	***
Zufriedenstellende Reinigungsleistung	Da es sich nur um Fäkalien und Urin handelt, ist bis auf die Hygienevorschrift wenig zu beachten. Allerdings herrscht eine unklare Rechtslage hinsichtlich der Ausbringung von Urin. Ebenso ist das Problem der Arzneimittelrückstände im Urin noch nicht endgültig geklärt.	**

**** Ziel sehr gut erfüllt, hohe Effektivität

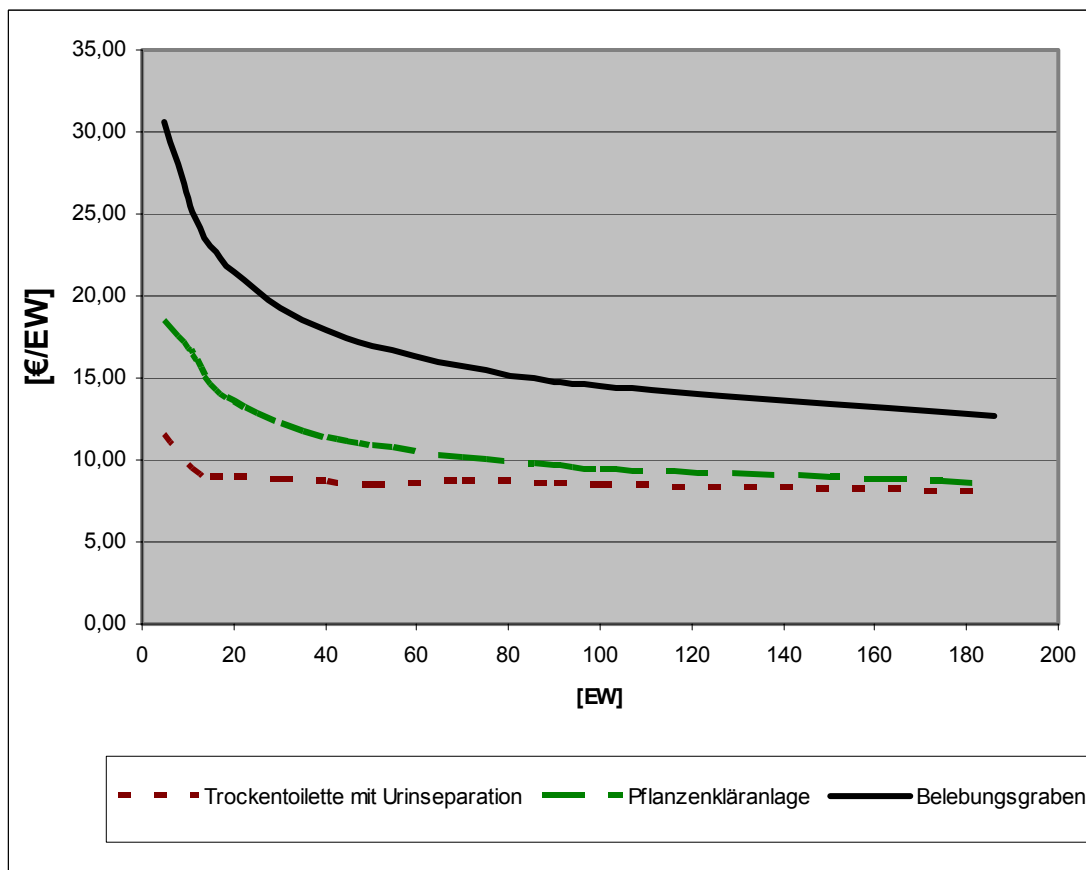
*** Ziel gut erfüllt, gute Effektivität

** Ziel gerade noch erfüllt, geringe Effektivität

* Ziel nicht erfüllt, nicht Effektiv bezogen auf das Ziel

10. Vergleich der Verfahren und Zusammenfassung

Abb. 10-1 Gesamtjahreskosten der betrachteten Systeme



Die Effektivität der einzelnen Systeme, bezogen auf die Zielsetzungen, wurde bereits in den Kapiteln 7 bis 9 abgehandelt. In diesem Kapitel geht es nun darum, die Effizienz der Systeme zu beleuchten. Für die Bewertung der Effizienz ist es wichtig einen Vergleichsmaßstab zu haben. Die Vergleichbarkeit der Systeme wurde in dieser Arbeit durch entsprechende Vorgaben, hinsichtlich der Bemessungsparameter und der Ziele, gesetzt.

Über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren wurden sämtliche Kosten der Abwasserbehandlung (Investitionskosten, Reinvestitionskosten, Betriebskosten) berücksichtigt und einer dynamischen Kapitalwertrechnung unterzogen.

Das nun vorliegende Ergebnis zeigt deutlich, dass die Pflanzenkläranlage und die Trockentoiletten mit Urinseparation beträchtliche Kostenvorteile gegenüber dem Belebungsverfahren aufweisen. Die Kostenvorteile schwanken zwischen 5 bis 10 € pro Einwohnerwert.

Diesen Kostennachteil kann das Verfahren Belebungsgraben eigentlich nur durch Zentralisierung, also Vergrößerung der Einwohnerzahlen ausgleichen.

Bis zu Einwohnerwerten von etwa 50.000 hat die Trockentoilette auch deutliche Kostenvorteile gegenüber den Pflanzenkläranlagen.

FAZIT : Insbesondere bei Ortschaften bis EW 30.000 sollte nicht unbedingt an die Anbindung an eine zentrale Kläranlage gedacht werden, sondern mehr daran, kreislauforientierten Systemen den Vorzug zu geben. Sie sind wie die Abb. 10-1 zeigt weitaus kostengünstiger und wie die Kapitel 7 bis 9 gezeigt haben, ökologischer. Den

endgültigen, technischen Beweis (im größeren Maßstab) müssen aber sowohl die Pflanzenkläranlage als auch das System Trockentoilette mit Urinseparation noch antreten.

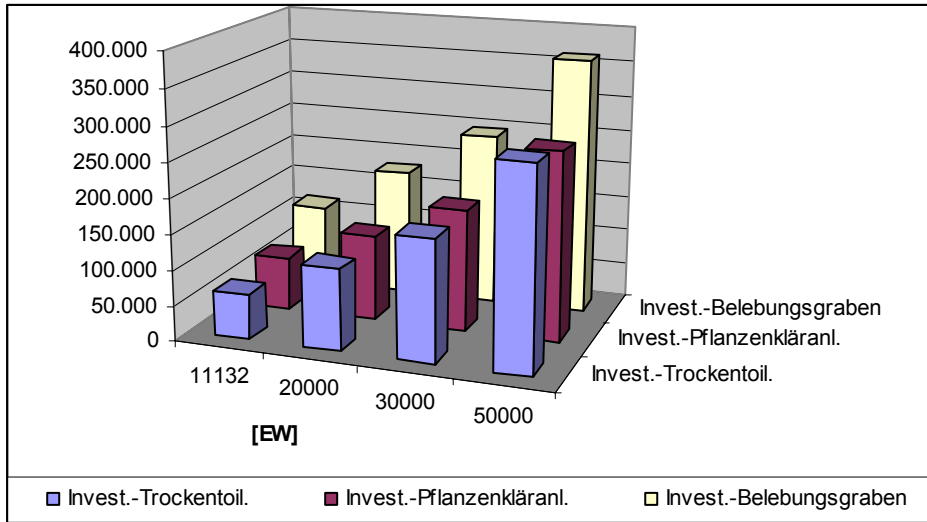


Abb. 10-2
Projektbarwert –
Investitionskosten der
betrachteten Systeme

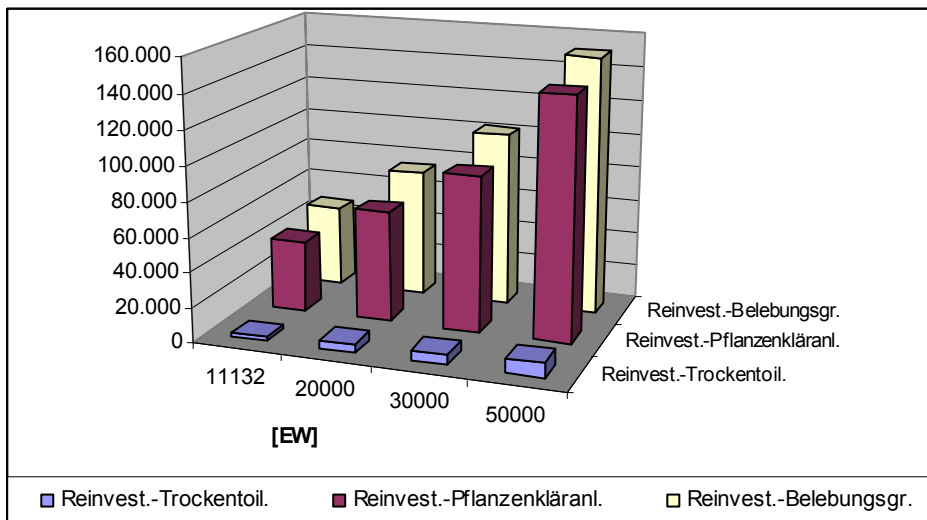


Abb. 10-3
Projektbarwert –Re-
investitionskosten der
betrachteten Systeme

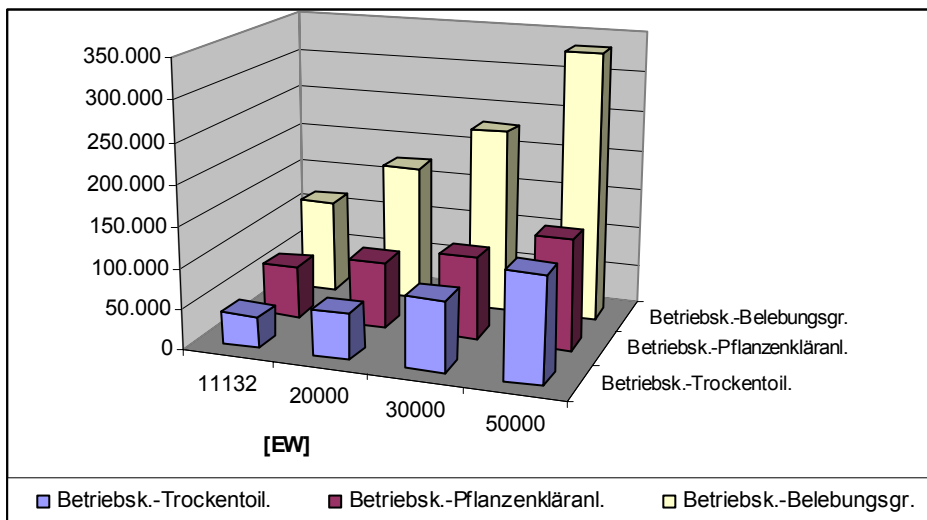


Abb. 10-2
Projektbarwert –
Betriebskosten der
betrachteten Systeme

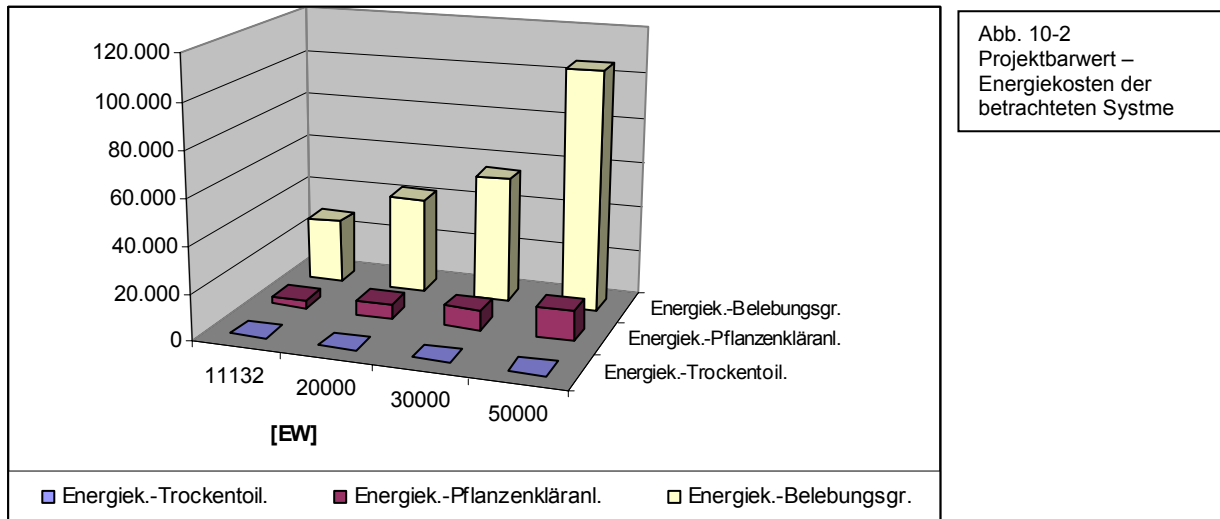


Abb. 10-2
Projektbarwert –
Energiekosten der
betrachteten Systeme

Betrachtet man das Gesamtsystem Abwasserentsorgung, so wird der Kostenvorteil der Trockentoilette mit Urinseparation noch eindeutiger. Ortskanalisationen und Transportkanäle können gänzlich eingespart werden. Die Kosten für einen Abholservice von Urin und Fäkalien, sind weitaus günstiger, wie die vorangegangnen Kapitel gezeigt haben.

Dennoch bleibt kritisch anzumerken, dass hinsichtlich der Grauwasserbehandlung geprüft werden muss, ob sich der Gemulchte Graben bei höherer Stadtdichte durchsetzen kann. Eventuell ist es erforderlich, eine Pflanzenkläranlage für die Grauwasserbehandlung einzusetzen. Dadurch würden sich zwar die Kosten des Systems erhöhen, aber immer noch merklich unter den Kosten eines konventionellen Systems (Belebungsgraben) bleiben.

Eine weitere offene Frage wird die Verwertung von Urin als Dünger sein. Zum einen aufgrund der Medikamentenrückstände im Urin und zum anderen der mehr rechtliche Aspekt Urin als Mineraldünger-Ersatz einzusetzen.

LITERATURVERZEICHNIS

Aichberger, K. (1990):

„Situation of sewage sludge in Austria. Use in agriculture, national guidelines and laws, future aspects“; In: Proceedings of long term effects of sewage sludge and farm slurries application, Athens, Commission of the European Communities

Albert, Erhard Dr. (2003):

In „Praxishandbuch Dünger und Düngung“, hrsg. von Harry Knittel und Erhard Albert. Unter Mitarb. von Thomas Ebertseder und Friedhelm Fritsch, Verleger: Bergen/Dumme : AgriMedia, 2003

ATV-DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (GFA) e.V. (Mai 2000):
„Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“; ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131, Mai 2000

ATV-DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (GFA) e.V. (Mai 2000):
„Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“; ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 262, Mai 2000

ATV-DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Mai 2003):
„Infrastruktur-abfälle: Abfälle aus der Reinigung von Kanälen, Sinkkästen und Regenbecken – Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (Rechen- und Sandfanggut)“; ATV-DVWK-Merkblatt M 369, Mai 2003

BAD (2006)

Stickstoff; Broschüre, Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Dr. Hagen Trott, Karlstraße 21, 60329 Frankfurt a.M., www.duengung.net

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2003):

„Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland“; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL); 7. überarbeitete Auflage

BMBF (Mai 2001):

„Benchmarking in der Abwasserbeseitigung auf der Basis technisch-wirtschaftlicher Kennzahlensysteme“; gefördert durch das BMBF Förderkennzeichen : 02WI9913/9; Abschlußbericht, Mai 2001

Bonewitz, Ronald Louis (2005):

„Steine & Mineralien“; Dorling Kindersley Limited, London

Braun, M.; Hurni, P. (1994):

„Phosphor und Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft und Para-Landwirtschaft“; Schriftenreihe der FAC Liebefeld. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld-Bern

Bretschneider, Hans; Lecher, Kurt; Schmidt, Martin (1993):

Taschenbuch der Wasserwirtschaft; 7. vollst. neubearb. Aufl., Verlag Paul Parey

Büchel, K.-H.; Moretto, H.-H.; Woditsch, P. (1999):

Industrielle anorganische Chemie; 3. Auflage – Weinheim u.a.: VCH

CAH – Consulaqua Hamburg Beratungsgesellschaft in Zusammenarbeit mit der GTZ (Deutsche Gesellschaft für Techn. Zusammenarbeit GmbH) (June 2006):

„Development of an ecologically sustainable water management concept for 13 Ethiopian Universities“; Baseline study

CES, Consulting Engineers Salzgitter GmbH, {Consultant} (March 2006):

„Concept report on wastewater and sludge reuse, General Establishment of Drinking Water and Sewerage in the Rural Province of Damascus (GEDWSRPD)“, Water sector Programme Barada Basin Damascus Rif Governorate, Draft concept report, Main Report & Annexes 1-3; Finanziert durch: KfW

Colin, F. (1983) :

„Influence des traitement sur la qualité des boues“; In Protection des sols et devenir des déchets, 11. 1983, La Rochelle, Frankreich, Ministère der l'environnement, Anred: 307-316

Feldhaus, R. (2003):

- „Siedlungswasserwirtschaft im ländlichen Raum“; Modul D - Abwasser, Kapitel 1, Abwasserableitung im ländlichen Raum, 1.Auflage, Bauhaus-Universität-Weimar, 2003
- Finck, A. (1991):
„Pflanzenernährung in Stichworten“, 5. Auflage, Ferdinand Hirt in der Gebr. Bornträger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart, 1991
- Finck, A. (1992):
„Dünger und Düngung: Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen“, 2. neu bearb. Auflage, Weinheim; u.a.: VCH, 1992
- Furrer, O.J.S. (1981):
„Wirksamkeit des Stickstoffs von verschiedenen Klärschlämmen im Vergleich zu Ammoniumnitrat“; In Symposium européen sur la caractérisation et l'utilisation des boues résiduaires. 13.02.-15.02.1979, Cadarache 247-252
- Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (2006):
„ecosan, technical data sheets for ecosan components, dehydration toilets“; 2006
- Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Hessen (17.10.2006):
„Verordnung zur Änderung der Verordnung über Zuweisungen zum Bau von Abwasseranlagen Teil I“; 27.10.2006, Nr. 19, vom 17.10.2006
- Geyler, Stefan; Holländer Robert (2005):
„Vergleich von zentralen und dezentralen Lösungen zur Abwasserentsorgung“, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus, Fachgebiet Ressourcenökonomie, 2005
- Gibb, Jacobs {Consultant} (Sept. 2005):
„Pre-Feasibility Studie, Damascus Rural Water and Wastewater Project“, Final Report; Finanziert durch: European Investment Bank (EIB)
- Günthert, Frank Wolfgang; Reicherter, Eckart (2001):
„Investitionskosten der Abwasserentsorgung“; Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft, Oldenbourg-Industrieverlag GmbH, München, 2001
- Höglund C. (2001):
Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source-separated human urine. Doctorial thesis, Royal Institute of Technology KTH, Swedish Institute for Infectious Disease Control SMI, Sweden
- Hoogenkamp A.W.H.M. (1992):
„Production of phosphate fertilisers“, RIVM rapportnr. 736301102, 1992
- Hopp, V. (Juli 2000):
„Grundlagen der Life-Science – Chemie, -Biologie-Energetik“, 1.Auflage, Wiley-VCH, Weinheim
- Imhoff, K. und Imhoff, K.R. (1999):
Taschenbuch der Stadtentwässerung. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 29. Auflage, 1999
- IWAG – Technische Universität Wien (Dezember 2001):
„Benchmarking in der Siedlungswasserwirtschaft“; Endbericht IWGA – Universität für Bodenkultur, Wien; Quantum – Institut für betriebswirtschaftliche Beratung GmbH, Klagenfurt; Im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft § 21 UFG 1993, Wien, Dezember 2001
- Kaub, Jan-Mauriz (2006):
„Mechanische Reinigung; Sedimentation, Vor- und Nachklär-becken“; Abwasser II-Abwasserbehandlung, Kapitel 4, 4.Auflage,; Bauhaus-Universität-Weimar, 2006
- Knittel, Harry Dr. (2003):

„Praxishandbuch Dünger und Düngung“, hrsg. von Harry Knittel und Erhard Albert. Unter Mitarb. von Thomas Ebertseder und Friedhelm Fritsch; **Verleger:** Bergen/Dumme: AgriMedia, 2003

Koppe, P.; Stozek, A. (1993):

„Kommunales Abwasser, Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktionen im Reinigungsprozeß einschließlich Klärschlämme“; 3 Auflage, Vulkan-Verlag, Essen

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA (1998):

„Leitlinien zur Durchführung von dynamischen Kostenvergleichsrechnungen“; Von: Arbeitskreis „Nutzen-Kosten-Untersuchungen in der Wasserwirtschaft“., 6. Auflage, 1998; Kulturbuch-Verlag Berlin

Lange J., Otterpohl, R. (2000):

„Abwasser, Handbuch zu einer zukunftsfähigen Wasserwirtschaft“; 2. Auflage, Mallbeton-Verlag, Donaueschingen-Pföhren

Lindenthal, T. (2000):

„Phosphatvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen und Phosphorversorgung im biologischen Landbau“, Wien, Universität für Bodenkultur: 290

Londong, Jörg (2006):

„Beschaffenheit des kommunalen Abwassers, Ermittlung von Bemessungsgrundlagen“; Abwasser II-Abwasserbehandlung, Kapitel 3, 4. Auflage,; Bauhaus-Universität-Weimar, 2006

Londong, Jörg (1987):

„Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge unter besonderer Berücksichtigung der gleichzeitigen Nutzung als Adsorptionsstufe“; Bd. 94. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TH Aachen, Aachen 1987

Martz, Georg (1990):

Klärtechnik Teil 3, in überarb. und erw. Aufl., Siedlungswasserbau, Düsseldorf: Werner-Ingenieur-Texte, 1990

Mohamed, Abir (2004):

„Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien“, Dissertation an der Universität Flensburg, Aus dem Institut für Biologie und Sachunterricht und ihre Didaktik der Universität Flensburg (Flensburg 2004)

Mosel, U. (Januar 2006):

„Grauwassernutzung zur Bewässerung gartenbaulich genutzter Flächen in ariden Gebieten“; Diplomarbeit an der TU Dresden, Betreuer: Träncker, J., Januar 2006

Moser, D. (1993):

„Interpretation von chemischen Analysedaten und Überprüfung ihrer Plausibilität“; Wiener Mitteilungen, Band 110, 1993

Nadauscher, I. (2001):

„Kompostierung menschlicher Ausscheidungen durch Verwendung biologischer Trockentoiletten – mit besonderer Berücksichtigung des Kleingartenbereiches“; Dissertation am Institut f. Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe. Schriftenreihe des ISWW Band 100, Karlsruhe 2001.

Jönsson, H.; Baky, A.; Jeppson, U.; Hellström, D.; Kärrman, E. (2005):

„Composition of urine, faecea, greywater and bio-waste for utilisation in the URWARE-model“; Urban Water report 2005/6 (noch nicht veröffentlicht)

Neubauer, Dieter (Oktober 1999):

„Demokrit läßt grüßen. Eine andere Einführung in die Anorganische Chemie“; Rowolt Taschenbuch Verlag

Neubert, Susanne (August 2003):

„Die Nutzung von Abwasser in der Landwirtschaft aus der Perspektive verschiedener Akteure, Umsetzungshemmnisse und mögliche Strategien in Tunesien“, Studie, , Deutsches Institut für Entwicklungspolitik (DIE), Bonn

Niederste-Hollenberg, Jutta (2003):

„Nährstoffrückgewinnung aus kommunalen Abwasser durch Teilstromerfassung und –behandlung in urbanen Gebieten“, Hrsg.: Gesellschaft zur Förderung der Forschung und Entwicklung der Umwelttechnologien an der Technischen Universität Hamburg-Harburg e.V. (GEFEU), Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2003

N.N. (02.12.2002):

„Phosphorus availability in the 21st century, Mangement of a non-renewable resource“; Homepage des Naturhistorischen Museums in London, <http://www.nhm.ac.uk/mineralogy/phos/p&k217/steen.htm>, vom 02.12.2002

Oldenburg, M. (2002):

„Erfahrungen aus Planung, Bau und Betrieb dezentraler und semizentraler Lösungen, Erfahrungen und Ergebnisse aus den Projekten Flintenbreite/Lübeck, Freiburg/Vauban, Lambertsühle/Burscheid“; unveröffentlichter Vortrag anlässlich der U.A.N. Expertenrunde „Das abwasserarme Haus – Erfahrungen aus der Praxis“, Hannover 04.09.2002

Oldenburg, M. (2003):

„Provintial towns programs II. Water supply and sanitation in towns Al-Sher-Ja’ar-Jiblah and Zinjibar“; Feasibility Study, Internal report

Onnen (2001)

Umweltschonende Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft“ Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn,

Otterpohl, R.; Oldenburg, M; Zimmermann, J. (1999):

„Integrierte Konzepte für die Abwasserensorgung ländlicher Siedlungen“; Wasser & Boden, 11/99

Otterpohl, R. (2002):

„Resource efficient wastewater concepts – technical options and initial experience“, 12. Europäisches Wasser-, Abwasser- und Abfall-Symposium (IFAT 2002), München

Pinnekamp, J. (Oktober 2002):

„Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“, in : KA-Wasserwirtschaft-Abwasser-Abfall, 49. Jahrgang, Nr. 10, Oktober 2002, GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwasser-technik e.V., Hennef

Quade, J. (1988):

„Die Zukunft der Minereraldüngung bei veränderten Produktionsbedingungen“; in Produktionsfaktor Umwelt: Wasser 1988; hrsg. von der Verbindungsstelle Landwirtschaft-Industrie e.V., Landwirtschaftsverlag

Reicherter, Eckart (2003):

„Untersuchungen zu Kennzahlen als Grundlage für Kostenbetrachtungen in der Abwasserentsorgung“; Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Mitteilungen Heft 84/2003; Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München 2003

Richter, W.; Suntheim, L. (1996):

„Phosphatfixierung in Verwitterungsböden auf Gneis. P-Fixierungsverhalten einer Berglehm-Braunerde“; Arch. Acker-Pfl.Boden. 44, 1996, 321-333

Robisch, Heiko (Februar 2003):

„Alternative Sanitärkonzepte und Nährstoffrecycling aus Abwasser“, Kommunale Umwelt-Aktion U.A.N., Februar 2003

Rodeco/GTZ/Aldar (2003):

„Decentralized sanitation project El Moufty el Kobra“, Final design report, Internal report

Rudolph, Karl-Ulrich Prof.Dr.-Ing.Dr.rer.pol.; Schäfer, Dirk Dipl. Ing. (Oktober 2001);

„Untersuchungen zum internationalen Stand und der Entwicklung Alternativer Wassersysteme“, Institut für Umwelttechnik und Management an der Unversität Witten/Herdecke gGmbH; Herausgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe; Forschungsvorhaben Nr. 02 WA 0074

- Schilling, G. (2000):
„Pflanzenernährung und Düngung“, Verlag Eugen Ulmer
- Schmidtke, Th. (2001):
„Controlling in der Abwasserwirtschaft“; Kapitel 3; Wirtschaftlichkeitsrechnung, Skriptum der Bauhaus-Universität Weimar mit ATV-DVWK, 2. überarbeitete Auflage, 2001
- Schmitt, Bianca Dipl. Ing. (FH), (2003):
„Nachhaltige Sanitärkonzepte und deren Anwendungsmöglichkeiten in Luxemburg“ – Fallstudie Neubausiedlung Nonnewisen in Esch-Alzette; Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-Umweltwissenschaftlerin an der Universität Koblenz-Landau, FB 3 Naturwissenschaften, Koblenz
- Simon, J.; Goldbach, H.; Schirmer, G.; Thuir, H.; Clemens, J. (Mai 2003):
„Verwertungsmöglichkeiten separierter Nährstoffe in der Landwirtschaft, Das Projekt Lambertsmühle – Zukunftsfähiges Abwassermanagement im ländlichen Raum“; Abschlusstagung, Mai 2003; Hrsg. Wupperverband
- Starkl M. (2005)
Nachhaltige Strategien der Abwasserentsorgung im ländlichen Raum – SUS-SAN, Forschungsprojekt, Lebensministerium.at,
- Steil, Robert (2002):
„Ausgewählte Stoffstrombilanzen für verschiedene Szenarien der Verwertung der luxemburger Klärschlämme“; Studie, Candidat au Lycée Technique Esch (LTE)
- Wagner, M. (2002):
„Aktuelle Ansätze bei der Klärschlammbehandlung- und entsorgung“, KA-Wasserwirtschaft, Abfall 49 (2)
- Wawra, Edgar; Dolznig, Helmut; Müllner, Ernst (2003):
Chemie erleben, UTB-Verlag
- Werner, Wilfried (2002):
„Nährstoffe, Nährstoffverfügbarkeit und Düngewirkung von Sekundärrohstoffdüngern unter besonderer Berücksichtigung von Phosphat,“; in Landwirtschaftliche Verwertung, KTBL Schrift
- Wilderer, P.
„Integrierte Ver- und Entsorgungssysteme für urbane Gebiete“; Wilderer, P.; TU München
- Wolz, H. (2001):
„Controlling in der Abwasserwirtschaft“; Kapitel 2; Skriptum der Bauhaus-Universität Weimar mit ATV-DVWK, 2. überarbeitete Auflage, 2001
- WHO (2006):
„Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater“; World Health Organization; Volume 2, Wastewater use in agriculture

STUDIEN

- KfW-Studie (2006)
General establishment of Drinking Water and Sewerage in Rural Province of Damascus (GEDWSRPD)
Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), Water Sector Programm BARADA Basin, Damascus Rif Governorate
Draft Concept Report March 2006
CES Consulting Engineers Salzgitter GmbH, GFA Consulting Group
- ArabTech (2006)
Water supply and sanitation in support of two palestine refugee camps, Khan Eshieh & Khan Eshieh and Khan Dannoun, Damascus countryside, Syrien, UNRWA Ref. 2001/003-291, Feasibility Study Report, March 2006
MWH Arabtech Jardaneh engineers & architects