

Angepasste Technologien zur Wasserförderung in Karstregionen und deren Implementierung in Schwellen- und Entwicklungsländern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Daniel Stoffel
aus Pforzheim

Tag der mündlichen Prüfung: 28.04.2016

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann
(Karlsruher Institut für Technologie)

Korreferent: Prof. Dr. Andreas Dittmann
(Justus-Liebig-Universität Gießen)

Karlsruhe 2016

Kurzfassung

Wasser ist die Grundlage allen Lebens, daher kommt der nachhaltigen Versorgung in ausreichender Menge und Qualität eine hohe Bedeutung zu. Weltweit leiden jedoch auch heute noch Millionen von Menschen unter einer defizitären Wasserversorgung, wobei die Folgen von Einschränkungen der (wirtschaftlichen) Entwicklung der betroffenen Regionen bis hin zu existenzbedrohenden Zuständen für die Bevölkerung reichen. Gründe für die Unterversorgung sind unterschiedlich: So können ungünstige naturräumliche Bedingungen zu einer Begrenzung der zur Verfügung stehenden Wasserressourcen führen, woraus letztlich eine physische Wasserknappheit resultiert. Wirtschaftliche Wasserknappheit ist hingegen bspw. die Folge von mangelndem finanziellem und/oder technologischem Potential, wodurch die Nutzbarmachung vorhandener Ressourcen erschwert oder gar verhindert wird.

Das komplexe Zusammenspiel aller Einflussgrößen steht häufig dem Einsatz standardisierter Lösungen im Wassersektor entgegen. Eine nachhaltige Wasserversorgung ist daher untrennbar mit der Anwendung von an die lokalen Bedingungen angepassten Technologien verbunden. Dieser deduktive Schluss stellt den Kern der vorliegenden Dissertation dar. Doch was bedeutet angepasste Technologie? Bezieht sich die Anpassung ausschließlich auf die Auswahl von Maschinen und Komponenten, also auf die *Hardware*? Oder ist die Schnittstelle „Mensch-Maschine“, die *Software*, in gleichem Maße für die nachhaltige Funktionserfüllung der technischen Einrichtung verantwortlich? Die Antwort der Schrift auf die letztgenannte Frage ist *Ja*, wodurch einem angemessenen Wissenstransfer für die künftigen Betreiber in allen Stadien der Technologieentwicklung und -implementierung eine entscheidende Bedeutung zukommt.

Diesem Anspruch entsprechend wird ein Lösungsansatz vorgestellt zur standortgerechten Dimensionierung und nachhaltigen Implementierung einer innovativen Wasserfördertechnologie. Diese Technologie kann als „wasserkraftbetriebenes Pumpsystem“ (WPS) beschrieben werden, welches sich durch hohe Robustheit und Effizienz sowie durch geringe Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten auszeichnet. Besagte WPS wurden durch das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner KSB AG, Frankenthal, entwickelt.

Die erstmalige Umsetzung eines WPS erfolgte innerhalb der F&E-Aktivitäten des deutsch-indonesischen Verbundvorhabens „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) Indonesien“, welches auf deutscher Seite durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Durch eine umfassende Evaluierung des Pilot-Fördersystems konnten im Rahmen der Dissertation vielfältige praktische Erfahrungen mit WPS gesammelt werden, welche als Basis für die Ausarbeitung der Implementierungsmethodik dienen. Deren Struktur sieht die kontinuierliche Einbindung der Zielpersonen (sowohl Betriebs- als auch Führungspersonal) in den Entstehungsprozess der technischen Einrichtung sowie die Befähigung dieser Personen zur Bewältigung aller Betriebs- und Wartungsaufgaben vor.

Abstract

Water is the basis of life, wherefore a sustainable supply of water with sufficient quantity and quality is of great importance. Nevertheless, still today millions of people suffer from a deficient water supply, whereby the effects range from limitations of the (economic) development to life-threatening conditions of the people of the concerned areas. Reasons for the undersupply differ: Unfavorable natural boundary conditions might limit the available water resources, ultimately resulting in a physical water shortage. Economic water shortage, however, is the consequence of lacking financial and/or technological potential, whereby the utilization of existing resources might be aggravated or even obstructed.

The complex interaction of all influencing variables is often opposed to the usage of standardized solutions in the water sector. Therefore, sustainable water supply is inseparably connected to the application of technologies which are adapted to the local conditions. This deductive conclusion represents the essence of the present dissertation. But what does adapted technology mean? Is the adaption solely referring to the selection of machines and components, the hardware? Or is the “human-machine” interface, the software, accountable to the same extent for the sustainable operability of the technical facility? The latter question can be answered with Yes, whereby an appropriate knowledge transfer for the future operators during all stages of the technology’s development and implementation acquires a major importance.

With respect to this requirement an approach to a solution is introduced which allows the dimensioning and sustainable implementation of an innovative water supply technology under consideration of site-specific boundary conditions. This technology can be described as “hydropower-driven pumping system” (HPS) which excels through high robustness and efficiency as well as through low investment, operation and maintenance related costs. These HPS were developed by the Institute for River Basin Management (IWG) of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in cooperation with the industry partner KSB AG, Frankenthal.

The first-time implementation of a HPS was accomplished within the R&D-activities of the German-Indonesian joint-project “Integrated Water Resources Management (IWRM) Indonesia”, which was funded on German side by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Within the frame of this dissertation an extensive evaluation of the pilot supply system were carried out whereby manifold experiences were gained, which later served as basis for the development of the implementation approach. This approach’s structure intends the continuous inclusion of the targeted individuals (operational personnel and management staff) in the origination process of the technical facility as well as the empowerment of these persons for mastering all operation- and maintenance- related tasks.

Danksagung

In den vergangenen fünf Jahren genoss ich das Privileg einen Beitrag zum Gelingen des internationalen Verbundvorhabens „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) Indonesien“ leisten zu dürfen. Diese von Seiten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung geförderte Kooperation bot u.a. den Rahmen zur Ausarbeitung der vorliegenden Doktorarbeit. Besonders erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang die aus meiner Sicht überaus fruchtbare Zusammenarbeit mit einer Vielzahl von Kollegen aus beiden Ländern, was sowohl aus fachlicher als auch aus menschlicher Sicht unglaublich bereichernd war. Da an dieser Stelle nicht alle in gebührendem Maße persönlich erwähnt werden können, möchte ich an all diese Kollegen zusammen ein großes „Dankeschön“ und „*terima kasih*“ richten – Ihr wisst wer gemeint ist.

Einige Personen seien aufgrund ihres wesentlichen Beitrags zur Fertigstellung meiner Dissertation dennoch namentlich genannt: Zunächst danke ich Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann für die Übernahme des Hauptreferats, für viele hilfreiche Ratschläge und die persönliche Unterstützung bei der Fertigstellung der Arbeit. Auch danke ich Prof. Dr. Andreas Dittmann von der Justus-Liebig-Universität Gießen für die Übernahme des Korreferats sowie für viele bereichernde Hinweise, wodurch ich weit über den „technischen Tellerrand“ blicken konnte. Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Helmut Bernhart, Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, Prof. Dr. Thomas Neumann sowie Prof. Dr. rer. nat. Joachim Vogt vom Karlsruher Institut für Technologie für die Übernahme des Vorsitz' bzw. ihr Mitwirken in der Prüfungskommission.

Die engste Zusammenarbeit der letzten Jahre ist vor allem mit zwei Namen verknüpft: Dr.-Ing. Peter Oberle und Dr.-Ing. Muhammad Ikhwan. Peter möchte ich herzlich dafür danken, mir diese einzigartige Chance eröffnet zu haben. Ikhwan gilt neben der fachlichen Unterstützung besonderer Dank für die tolle Büroatmosphäre, die guten „fußballtechnischen“ und sonstigen Gespräche sowie für die spannenden gemeinsamen Reisen. Auch den Kollegen unseres Industriepartners KSB AG, Frankenthal, Dr.-Ing. Jochen Fritz und insbesondere Dipl.-Ing. Steffen Schmidt, möchte ich für die hervorragende Zusammenarbeit während der letzten Jahre danken.

Bei meinen Eltern möchte ich mich ganz herzlich für die fortwährende und umfassende Unterstützung bedanken, welche sie mir stets auf verschiedenste Weise gewährt haben.

Last but not least möchte ich meine Ehefrau Tanja nennen – ihr gebührt der größte Dank. Sie hat mir stets den Rücken freigehalten und meiner Arbeit Vorrang gewährt, hat mir hilfreiche Ratschläge für die Ausarbeitung gegeben und mich kontinuierlich mental unterstützt. Ohne sie hätte diese Arbeit nicht entstehen können, daher an dieser Stelle ein ganz großes „Dankeschön“ für alles, was Du in den letzten Jahren geleistet hast. Es ist unglaublich toll, auf so einen Rückhalt bauen zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Motivation und Zielsetzung.....	2
1.3	Gliederung der Arbeit	4
2	Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements	5
2.1	Wasser-Energie-Nexus	5
2.2	Wasserbedarf vs. Wasserverfügbarkeit.....	9
2.3	Naturräumliche Einflüsse.....	16
2.3.1	Hydrogeologische Standortbedingungen.....	16
2.3.2	Erderwärmung und (verstärkte) Klimaphänomene	17
2.3.3	Karst und Wasser.....	19
2.4	Einflüsse von Bevölkerung und Gesellschaft	21
2.4.1	Migration und Urbanisierung	21
2.4.2	<i>Brain-Drain</i> -Effekt.....	23
2.4.3	Soziologische und technologische Einflüsse	23
2.5	Angepasste Technologien und Technologietransfer	25
2.6	Das F&E-Verbundvorhaben „IWRM Indonesien“	27
2.6.1	Begriffsdefinition IWRM.....	27
2.6.2	Ziele des Verbundvorhabens und der Dissertation	29
2.6.3	Verbundstruktur und -partner	31
2.6.4	Indonesien im Überblick	33
2.6.4.1	Lage und Bevölkerungsstruktur Indonesiens	33
2.6.4.2	Politische Situation und Verwaltung.....	34

2.6.4.3	Wirtschaftliche Situation.....	35
2.6.4.4	Der indonesische Energiemarkt.....	36
2.6.4.5	Wasserversorgung mit dem Fokus auf Karstgebieten.....	38
2.6.5	Die Modellregion <i>Gunung Kidul</i>	40
2.6.5.1	Geografische und wirtschaftliche Lage	40
2.6.5.2	Klima und Hydrologie.....	41
2.6.5.3	Geologie und Hydrogeologie	46
2.6.5.4	Stand der Wasserversorgung	49
3	Wasserrförderung: Historische, aktuelle und innovative Ansätze.....	53
3.1	Historische Wasserrfördersysteme	54
3.2	Hauptpumpenbauarten in der Wasserrförderung.....	55
3.3	Hydraulik von Kreiselpumpen.....	58
3.3.1	Einsatzbereiche.....	58
3.3.2	Anlagenförderhöhe und Verlusthöhe	59
3.3.3	Kennlinien und Kenngrößen.....	60
3.3.4	Regelungsarten.....	65
3.4	Hydraulik von rückwärtslaufenden Kreiselpumpen	69
3.4.1	Leerlauf- und Widerstandskennlinie	69
3.4.2	Regelungsarten.....	70
3.4.3	PAT-Technologie vs. konventionelle Wasserturbinen.....	73
3.5	Antriebe von Wasserrfördersystemen.....	75
3.5.1	Archaische Antriebe	75
3.5.2	Konventionelle Antriebe	76
3.5.3	Antriebe auf Basis erneuerbarer Energien.....	78
3.5.3.1	Biomasse.....	78
3.5.3.2	Geothermie.....	79
3.5.3.3	Solarenergie	80
3.5.3.4	Windkraft	81
3.5.3.5	Wasserkraft	82
3.5.4	Antrieb durch invers betriebene Kreiselpumpen	83
3.6	Planungsgrundlagen für WPS (am Beispiel <i>Bribin</i>).....	85

4	Betriebsanalyse der Wasserförderanlage <i>Bribin</i>	89
4.1	Das Wasserfördersystem der Anlage <i>Bribin</i>	90
4.2	Wechselwirkungen zwischen Anlage und Umwelt	94
4.3	Die Regelung der Anlage <i>Bribin</i>	95
4.3.1	Das Regelungskonzept	95
4.3.2	Das Regelungssystem	96
4.3.3	Anpassung und Erweiterung von Konzept und System (M1 bis M3).....	97
4.4	Initiierung des Dauerbetriebs.....	102
4.4.1	Personalschulung.....	103
4.4.2	Strategie zur Inbetriebnahme	105
4.4.3	Evaluation der Arbeitsbedingungen.....	106
4.5	Validierung der Förderleistung	109
4.5.1	Vorgehen	109
4.5.2	<i>In-situ</i> Messkampagne	110
4.5.3	Gesamtbewertung.....	114
4.6	Betriebsanalyse.....	116
4.6.1	Wasserdargebot.....	116
4.6.2	Anlagennutzungsgrad	118
4.6.3	Förderpotential und mittlere Förderrate	121
4.7	Erweiterung des Hochwasserentlastungssystems (M4).....	122
4.8	Anpassung des Injektions- und Drainagesystems (M5)	125
4.9	Festlegung von Betriebsstrategien (M6).....	128
4.10	Analyse des Fördersystems	130
4.10.1	Bewertung der Maschinendynamik.....	130
4.10.2	Schadensanalysen	132
4.10.3	Anpassung des Fördersystems und Optimierung von Betriebsmitteln (M7).....	137
4.11	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	139
4.12	Institutionelle Einbindung der Anlage <i>Bribin</i>	142

5	Ansatz zur Technologieimplementierung in der Wasserförderung	149
5.1	Analogie zur <i>bloom'schen</i> Lernzieltheorie	150
5.2	Adaption von Problemlösungsprozessen.....	152
5.3	Struktur des Implementierungsansatzes.....	153
5.3.1	Schritt 1: Situationsanalyse	154
5.3.2	Schritt 2: Designentwicklung	156
5.3.3	Schritt 3: Implementierung.....	158
5.3.4	Schritt 4: Validierung, Lernen, Standardisierung.....	158
5.3.5	Schritt 5: Optimierung.....	159
5.3.6	Anwendung des Implementierungsansatzes	161
5.4	Dimensionierung eines WPS.....	161
5.4.1	Hydraulische Bemessung.....	161
5.4.2	Bewertung der Feststoffbeladung.....	165
5.4.3	Automatisierung des Dimensionierungsprozesses	167
6	Innovative Technologietransferansätze.....	169
6.1	Demonstrationsanlage als Lehr-, Forschungs- und Anschauungsobjekt.....	169
6.1.1	Funktionsbeschreibung	170
6.1.2	Dimensionierung des WPS.....	172
6.1.3	Messsystem für betriebsbegleitendes <i>Monitoring</i>	176
6.1.4	Einsatzbereiche.....	177
6.2	Pilotanlagen unter extremen naturräumlichen Bedingungen.....	178
6.2.1	Beschreibung der Modellregion <i>Dong Van</i>	178
6.2.2	Zielsetzung des F&E-Verbundes	179
6.2.3	Konzept I: Pilothaftige Umsetzung an der Wasserkraftanlage <i>Seo Ho</i>	181
6.2.4	Konzept II: Planung der Umsetzung in der Karsthöhle <i>Sang Ma Sao</i>	184
6.2.5	Einsatzbereiche.....	186
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	187

Abbildungsverzeichnis

2.1: Unterteilung von anthropogenen und natürlichen Prozessen in die Sektoren (von oben im Uhrzeigersinn) menschliche Siedlungen, Landwirtschaft, Industrie und Energiewirtschaft sowie Ökosysteme	9
2.2: Schema der Zusammensetzung des Wasserfußabdrucks (WF), verändert nach WWF (2009).....	10
2.3: Wasserintensiver Reisanbau am Beispiel Tansania (links), Bewässerungslandwirtschaft in ariden Regionen (rechts).....	13
2.4: Beispiele für industrielle Abwasserströme in Schwellen- und Entwicklungsländern (links) sowie für die Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in Industrienationen (rechts).....	14
2.5: Ausgetrocknetes Flussbett in China (links), feuchte Landschaft in Thüringen (rechts).....	17
2.6: Weltweite Verteilung von Karbonatgestein	19
2.7: Blockbild einer Karstlandschaft zur Veranschaulichung unterirdischen Wasserressourcen sowie des unterirdischen Wasserkraftpotentials, verändert nach Goldscheider und Drew (2007).....	20
2.8: Beispiele für <i>Mega Cities</i> (Tokio, Japan, links) und <i>Slums</i> (Mumbai, Indien, rechts).....	22
2.9: Schema der unterirdischen Wasserförderanlage <i>Bribin</i> , verändert nach Nestmann et al. (2009).....	30
2.10: Reliefkarte Südostasiens, Landfläche Indonesiens gelb-transparent gekennzeichnet (Banfi, 2012).....	34
2.11: Verteilung von Karstgebieten in Indonesien und Kennzeichnung der Hauptinsel <i>Java</i> , verändert nach Nestmann et al. (2010a)	39
2.12: Die indonesische Hauptinsel <i>Java</i> und der Bezirk <i>Gunung Kidul</i>	40
2.13: Einheimische bei der Feldarbeit ohne (links) und mit Einsatz von Nutztieren (rechts)	41
2.14: Niederschlagsverteilung (links) und Topografie (rechts) <i>Gunung Kiduls</i> auf Basis der Zeitreihe 1952 bis 2009, verändert nach Brunsch et al. (2011).....	42
2.15: Betrachtung der Trockenzeit: SST und Niederschlagsmengen <i>Gunung Kiduls</i> (links), negative lineare Korrelation zwischen SST-Anomalie und Niederschlägen (1952 bis 2009), beide verändert nach Brunsch et al. (2011).....	43
2.16: Mittlere Monatsniederschläge der Jahre 1952 bis 2009 sowie der 11 <i>El-Niño</i> -Jahre aus diesem Zeitraum (links), Trendanalyse der Jahresniederschläge <i>Gunung Kiduls</i> sowie der	

Niederschlagsmengen in Regen- und Trockenzeit auf Basis der Zeitreihe 1952 bis 2011 (rechts), beide verändert nach Brunsch et al. (2011)	44
2.17: Kalkabbau in <i>Gunung Sewu</i> mit möglichen Auswirkungen auf die Fließcharakteristik der Karstflüsse (links), bspw. durch Veränderungen der morphologischen Gegebenheiten in der Nähe von Ponoren (rechts)	44
2.18: Exemplarische Analyse der Zeitreihen des hydrologischen Messsystems (oben und Mitte) sowie des <i>Monitoring</i> -Systems der Anlage <i>Bribin</i> (unten, siehe Kapitel 4.3.3) vom Februar 2012	45
2.19: <i>Gunung Sewu</i> in der Regenzeit (links), ausgetrockneter „ <i>Telaga</i> “ in der Trockenzeit (rechts)	47
2.20: Karsthydrologie der <i>Gunung Sewu</i> (MacDonald & Partners, 1984)	48
2.21: Entwicklungsstufen der Wasserversorgung in <i>Gunung Sewu</i> , verändert nach Dittmann et al. (2011).....	50
3.1: Hydraulischer Widder in der „Ladephase“ (links) und beim Ausstoßen des Triebwassers (rechts).....	54
3.2: Funktionsschema eines hydraulischen Widders	55
3.3: Schnittbild Hubkolbenpumpe (links; 1 Wellendichtung, 2 Flansch, 3 Haltering, 4 Kolben, 5 Ventilteller, 6 Schwenkscheibe, 7 Zylindermantel, 8 Feder, 9 Endplatte, 10 Anschlussflansch), Hubkolbenpumpe Typ PAH 4 Hersteller Danfoss A/S (rechts)	56
3.4: Schnittbild Kreiselpumpe (links; 1 Gehäuse, 2 Laufrad, 3 Druckdeckel, 4 Wellendichtung, 5 Welle, 6 Zwischenstück, 7 Lagerträger, 8 Saugstutzen, 9 Druckstutzen) (Karger und Hoffmann, 2013), Kreiselpumpe ETANORM Hersteller KSB AG (rechts)	57
3.5: Verschiedene Laufradformen von Kreiselpumpen, verändert nach Hellmann (2009).....	58
3.6: Pumpenkennlinien für verschiedene Drehzahlen sowie flache (I) und steile (II) Rohr- bzw. Anlagenkennlinie, verändert nach Karger und Hoffmann (2013).....	59
3.7: Stabile (links) und instabile Drosselkurven (rechts), verändert nach Bohl und Elmendorf (2004).....	61
3.8: Vollständiges Kennfeld einer radialen Strömungsmaschine sowohl für den Pump- (links) als auch für den Turbinenbetrieb (rechts), verändert nach Bohl und Elmendorf (2004)	64
3.9: Drossel- (links) und Bypassregelung (rechts) von Kreiselpumpen, beide verändert nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)	65
3.10: Einfluss der Drehzahl auf die Kennlinie einer Kreiselpumpe, verändert nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)	66
3.11: Parallelbetrieb (links) und Reihenschaltung (rechts) von Kreiselpumpen, beide verändert nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)	68
3.12: Regelung einer PAT durch Drosselung oder Bypassregelung, verändert nach Gülich (2010)	71
3.13: Maßgebende Eigenschaften angepasster Technologien	85

3.14: Übersicht der maßgebenden Auslegungsparameter für WPS am Beispiel der Anlage <i>Bribin</i> , <i>Gunung Kidul</i> , Indonesien, verändert nach Nestmann et al. (2009).....	86
4.1: Modulares Design der Förderanlage <i>Bribin</i> , verändert nach Oberle et al. (2009).....	91
4.2: Das Fördersystem der Anlage <i>Bribin</i> nach der Implementierung der finalen Ausbaustufe .	93
4.3: Durchflussleistung des Hochwasserentlastungssystems der Anlage <i>Bribin</i> vor der Erweiterung durch einen hydraulischen Bypass (siehe Kapitel 4.7), verändert nach Mastaller (2013)	95
4.4: Funktionsschema des im Rahmen der Dissertation entwickelten Kontrollsystems für die Anlage <i>Bribin</i>	100
4.5: Schaltschrank des Kontrollsystems in <i>Bribin</i> vor der Umgestaltung (links), nach der Anpassung zusammen mit dem Notaussystem (rechts)	101
4.6: Durchführung von praktischen und theoretischen Schulungen für <i>Bribins</i> Betriebspersonal	103
4.7: Überflutung der Anlage <i>Bribin</i> (Januar 2011) führte zu Verunreinigung der Maschinen...	103
4.8: Im Rahmen der vorliegenden Dissertation entworfene Schulungs-, Betriebs- und Wartungsunterlagen für das Personal der Anlage <i>Bribin</i>	104
4.9: Anpassung des zulässigen Betriebsbereichs (Stauhöhe mit Toleranzbereich von $\pm 0,5$ m) in Abhängigkeit von der Erfahrung des Betriebspersonals, zulässiger Betriebsbereich durch gestrichelte Linien markiert.....	106
4.10: Wartungsarbeiten am Kontroll- (links) sowie am Fördersystem (rechts) in <i>Bribin</i> durch den lokalen Betreiber	106
4.11: Durchflussmessungen mittels Ultraschallmessgerät in Zusammenarbeit mit dem Betreiber PU und der Universität <i>Gadjah Mada</i> (UGM), <i>Yogyakarta</i> , (links) in <i>Bribin</i> und am Verteilspeicher <i>Kaligoro</i> (Mitte und rechts)	110
4.12: Jeweils 1 Modul in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der <i>in-situ</i> und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte).....	112
4.13: Jeweils 2 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der <i>in-situ</i> und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte).....	112
4.14: 3 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der <i>in-situ</i> und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte).....	113
4.15: 4 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der <i>in-situ</i> und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte).....	113
4.16: 5 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der <i>in-situ</i> und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte).....	114

4.17: Förderleistung der Anlage <i>Bribin</i> in Abhängigkeit von der Druckhöhe und der Anzahl der Module	115
4.18: Auswertung der kontinuierlich aufgezeichneten Daten von Juli 2011 bis Juni 2014: Abflussdargebot des Flusses <i>Bribin</i> , gemittelte Monatswerte als Blockdiagramm, Minimal- und Maximalwert des Abflusses als Punktdiagramm, Ausbaudurchfluss der Anlage bei Vollast als gestrichelte Horizontale	117
4.19: Potentieller und realer Anlagennutzungsgrad als Funktion der Anzahl von Modulen in Betrieb; erstellt auf Basis der mithilfe des Kontrollsystems generierten Betriebsdaten im Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2014	118
4.20: Mittlere Anzahl an Regelungsvorgängen am Hochwasserentlastungssystem (HWE) und an den Modulen (links), Anteile verschiedener Betriebsbereiche (rechts); Betrachtungszeitraum jeweils Juli 2011 bis Juni 2014	120
4.21: Anteile verschiedener Betriebsbereiche in Trocken- (links) und Regenzeit (rechts), einschließlich der Entwicklung über den gesamten Betrachtungszeitraum von Juli 2011 bis Juni 2014	120
4.22: Vergleich der realen und potentiellen mittleren Jahresförderrate (Betrachtungszeitraum Juli 2011 bis Juni 2014 für die ersten drei Betriebsjahre).....	122
4.23: Überschreitung der Bemessungstauhöhe infolge extremer Abflussereignisse im März 2012 (links), Erweiterung der Durchflusskapazität des Hochwasserentlastungssystems im Vergleich zum in Abbildung 4.3 dargestellten ursprünglichen Zustand (rechts)	123
4.24: 3D-CAD-Modell von Modul 3 vor (links) und nach (rechts) Umsetzung der Umbaumaßnahme (rot: zu verändernde bzw. veränderte Komponenten) (Mastaller 2013)	124
4.25: Schema des Drainage- (links) und Injektionssystems (rechts) in <i>Bribin</i>	126
4.26: Korrelation von Sickerwasser und Stauhöhe für den Zeitraum Juli bis September 2014 .	128
4.27: Darstellung der Messstellen zur Bewertung der Maschinendynamik	131
4.28: Bruch von Lagerring (links) und Wälzkörper (rechts).....	133
4.29: Verschleißerscheinungen an Polymernocken (links) und Gussnaben (rechts) der Kupplungen zwischen PAT und Getriebe	138
4.30: Einsatz von Axialkompensatoren zur Lastreduzierung am PAT-Druckstutzen bei den Modulen 3, 4 und 5 (links), Installation von Aufhängungen für die PAT-Druckrohre (rechts)	138
4.31: Strompreisentwicklung für die indonesische Tarifklasse I-3 seit 2009 mit Ausblick bis zum Jahr 2019	142
4.32: Reduziertes Organigramm der Behörde BBWS-SO mit den für die Anlage <i>Bribin</i> relevanten Abteilungen (weitere Hierarchiestufen, die für die Anlage nicht bedeutsam sind, sind durch gestrichelte Linien angedeutet).....	144
4.33: Reduziertes Organigramm der Behörde PDAM mit den für die Anlage <i>Bribin</i> relevanten Abteilungen (weitere Hierarchiestufen, die für die Anlage nicht bedeutsam sind, sind durch gestrichelte Linien angedeutet).....	145

5.1: Struktur des im Rahmen der Dissertation entwickelten Implementierungsansatzes für Wassertechnologien.....	153
5.2: Einsatzbereich verschiedener Pumpentypen für den inversen Betrieb, verändert nach KSB AG (2012)	163
5.3: Exemplarische Darstellung kritischer Stellen einer Gliederpumpe in Bezug auf die Feststoffbeladung (hier im Beispiel Typ Multitec der KSB AG)	165
6.1: Standort der Demonstrationsanlage auf dem Campus der UGM, weiße Pfeile geben Fließrichtung an	171
6.2: Wissenstransfer durch angepasste Schulungsposter (links: Allgemeine Funktionsbeschreibung; Mitte: Beschreibung des Holzdruckrohrs; rechts: Beschreibung des WPS).....	172
6.3: Aufbau des WPS an der UGM mit zwei parallel geschalteten Fördermodulen.....	173
6.4: Maschinenspezifikation der Module 1 (links) und 2 (rechts).....	173
6.5: 3D-CAD-Modell der Demonstrationsanlage an der UGM, <i>Yogyakarta</i> , mit Kennzeichnung der maßgeblichen Anlagenbestandteile, verändert nach Banfi (2012)	175
6.6: Deckplatte des Schaltschranks des <i>Monitoring</i> -Systems (links), gestaltet durch einen indonesischen Designer, Nutzung des Messsystems im Rahmen studentischer Praktika (rechts).....	176
6.7: Kennzeichnung der maßgebenden Komponenten des Messsystems an der Demonstrationsanlage der UGM: Induktive Durchflussmesser in der PAT-Zuleitung (1) und Förderleitung (2), Druckaufnehmer in der Falleitung (3) und induktive Drehzahlmesser an Modul 1 (4) und 2 (5).....	177
6.8: Markierung der nördlichsten Provinz Vietnams, <i>Hà Giang</i> (links), Darstellung der Zonen innerhalb des Distrikts <i>Dong Van</i> (in <i>Hà Giang</i> gelegen), deren künftige Versorgung mittels WPS von Seiten des KaWaTech-Verbundes geplant ist (siehe Kapitel 6.2.3) (rechts)	179
6.9: R&I-Schema der bestehenden Wasserkraftanlage <i>Seo Ho</i> sowie der geplanten Erweiterung durch ein Wasserfördersystem in Anlehnung an Konzept I.....	181
6.10: 3D-CAD-Modell des WPS als Erweiterung der Wasserkraftanlage <i>Seo Ho</i> , rechts unten eine verkleinerte Darstellung der realen Anlage	182

Tabellenverzeichnis

2.1:	Mittlere Wasserproduktionskosten in den USA	6
2.2:	<i>Workpackages</i> des IWRM-F&E-Verbundes	32
3.1:	Spezifische Drehzahl und Förderhöhen für Pumpen verschiedener Bauart	59
3.2:	Einfluss der Bauart auf Einsatzbereiche von Kreiselpumpen	59
4.1:	Spezifikation der in <i>Bribin</i> eingesetzten Modulkomponenten	91
4.2:	Spezifikation der in <i>Bribin</i> eingesetzten Kupplungstypen	92
4.3:	Spezifikation der eingesetzten Durchflussmesser zur Validierung des Fördersystems der Anlage <i>Bribin</i>	109
4.4:	Im Rahmen der Messkampagne analysierte Modulkombinationen	111
4.5:	Real ermittelte mittlere Förderrate in Abhängigkeit der Anzahl von Modulen in Betrieb	121
4.6:	Betriebsvorgaben für die Anlage <i>Bribin</i> in Abhängigkeit von der Fallhöhe	129
4.7:	Ergebnisse der Schwingungsanalyse an den Pumpen und PAT der Förderanlage <i>Bribin</i>	132
4.8:	Analyse von PAT-Lagerschäden in <i>Bribin</i>	134
4.9:	Analyse PAT-Dichtungsversagen in <i>Bribin</i>	135
4.10:	Analyse Nockenringverschleiß zwischen PAT und Getriebe in <i>Bribin</i>	136
4.11:	Analyse Dichtungsversagen an der Förderpumpe in <i>Bribin</i>	137
4.12:	Förderkosten (durch gerundete Werte dargestellt) der Anlage <i>Bribin</i> und konventioneller Förderanlagen mit alternativer Energieversorgung in Anhängigkeit von der mittleren Jahresförderrate	141
5.1:	Beschreibung kognitiver Prozesse nach <i>Bloom</i>	151
6.1:	Prüffeldergebnisse der Module für die Demonstrationsanlage an der UGM	174
6.2:	Ergebnisse der Prüffeldtests der KSB AG zu Konzept I	183

Symbolverzeichnis

Arabische Symbole	Einheit	Bedeutung
A	[-]	Schnittpunkt Anlagen- und Turbinenkennlinie
B	[-]	Betriebspunkt
B₁	[-]	Betriebspunkt 1
B₂	[-]	Betriebspunkt 2
B_I	[-]	Betriebspunkt I
B_{II}	[-]	Betriebspunkt II
D	[-]	Anlagenpunkt
g	[m s ⁻²]	Erdbeschleunigung (9,81 m s ⁻²)
H	[m]	Fall- oder Förderhöhe
H₀	[m]	Nullförderhöhe
H_A	[m]	Anlagenförderhöhe
H_{geo}	[m]	Geodätische Förderhöhe
H_P	[m]	Förderhöhe
H_{P1}	[m]	Förderhöhe im Betriebspunkt 1
H_{P2}	[m]	Förderhöhe im Betriebspunkt 2
H_{P,opt}	[m]	Förderhöhe im Bestpunkt
H_T	[m]	Fallhöhe
H_V	[m]	Verlusthöhe
i	[-]	Übersetzungsverhältnis eines Getriebes
M	[Nm]	Drehmoment
M_w	[Nm]	Wellendrehmoment
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
n₁	[min ⁻¹]	Drehzahl im Betriebspunkt 1
n₂	[min ⁻¹]	Drehzahl im Betriebspunkt 2

n_q	[-]	Spezifische Drehzahl
NPSH	[m]	<i>Net Positive Suction Head</i>
NPSH₃	[m]	<i>Net Positive Suction Head</i> kavitationsbedingter Förderhöhenabfall 3 %
NPSH_A	[m]	<i>Net Positive Suction Head available</i>
NPSH_R	[m]	<i>Net Positive Suction Head required</i>
p_a	[bar]	Druck am Pumpenausgang
p_e	[bar]	Druck am Pumpeneingang
P_{PA}	[W]	Leistung Pumpenaggregat
P_{PA1}	[W]	Leistung Pumpenaggregat im Betriebspunkt 1
P_{PA2}	[W]	Leistung Pumpenaggregat im Betriebspunkt 2
P_{th}	[W]	Theoretische Pumpenleistung
P_V	[W]	Verlustleistung
Q	[m ³ s ⁻¹]	Abfluss, Durchfluss
Q_A	[m ³ s ⁻¹]	Ausbaudurchfluss
$Q_{max,DN}$	[m ³ s ⁻¹]	Maximaler Durchfluss bei einem bestimmten Nenndurchmesser
Q_{min}	[m ³ s ⁻¹]	Minimaler Abfluss, Durchfluss
$Q_{min,S}$	[m ³ s ⁻¹]	Nutzbarer minimaler Abfluss, Durchfluss
Q_P	[m ³ s ⁻¹]	Fördermenge
Q_{P1}	[m ³ s ⁻¹]	Fördermenge im Betriebspunkt 1
Q_{P2}	[m ³ s ⁻¹]	Fördermenge im Betriebspunkt 2
$Q_{P,opt}$	[m ³ s ⁻¹]	Fördermenge im Bestpunkt
Q_T	[m ³ s ⁻¹]	Schluckvermögen PAT
$Q_{T,opt}$	[m ³ s ⁻¹]	Schluckvermögen im Bestpunkt
S	[-]	Sicherheitsfaktor
v	[m s ⁻¹]	Strömungsgeschwindigkeit
v_a	[m s ⁻¹]	Strömungsgeschwindigkeit am Pumpenausgang
v_e	[m s ⁻¹]	Strömungsgeschwindigkeit am Pumpeneingang
v_U	[m s ⁻¹]	Umfangsgeschwindigkeit am Laufradausgang

Griechische Symbole	Einheit	Bedeutung
ΔK_a	[mm]	Zulässiger axialer Versatz
ΔK_r	[mm]	Zulässiger radialer Versatz
ΔK_w	[grad]	Zulässiger Winkelversatz
ζ	[-]	Verlustbeiwert
η	[-]	Wirkungsgrad
η_A	[-]	Wirkungsgrad Antriebsmaschine
$\eta_{\text{Komp.}}$	[-]	Wirkungsgrad Komponenten (Getriebe, Kupplungen usw.)
η_{opt}	[-]	Wirkungsgrad im Bestpunkt
η_P	[-]	Wirkungsgrad Pumpe
η_{PA}	[-]	Wirkungsgrad Pumpenaggregat
η_T	[-]	Wirkungsgrad Turbine
ρ	[kg m ⁻³]	Dichte von Wasser (1.000 kg m ⁻³)

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASC	<i>Acintyacunyata Speleological Club</i>
ASK	Absperrklappe
BAPETEN	<i>Badan Pengawas Tenaga Nuklir</i>
BLU	<i>Badan Layanan Umum</i>
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BBWS-SO	<i>Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak</i>
BRIC	Brasilien, Russland, Indien, China (BRIC-Staaten)
Bspw.	Beispielsweise
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CDM	<i>Clean Development Mechanism</i>
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i>
CIP	CIP GmbH, Pforzheim
CIP	<i>Continuous Improvement Process</i>
COS	COS Systemhaus OHG, Ettlingen
DaTEF	Problemlösungsverfahren (Akronym)
DED	<i>Detailed Engineering Design</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIY	<i>Daerah Istimewa Yogyakarta</i>
DN	Nenndurchmesser
DSS	<i>Desicion Support System</i>
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
ENSO	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>
EQF	<i>European Qualifications Framework</i>

ES	<i>Ecosystems Services</i>
ESDM	<i>Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral</i>
EStA	Ersatzstromerzeugungsanlage
EVN	<i>Electricity Vietnam</i>
F&E	Forschung und Entwicklung
FMEA	Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse
FTA	Fehlerbaumanalyse
GCA	<i>Government Contracting Agencies</i>
ggf.	gegebenenfalls
GIF	GIF GmbH, Ettlingen
GIK	Geodätisches Institut Karlsruhe (Karlsruher Institut für Technologie)
GIS	Geoinformationssystem
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
GWP	<i>Global Water Partnership</i>
HfG	Staatliche Hochschule für Gestaltung Karlsruhe
HPS	<i>Hydropower-driven pumping system</i>
HWE	Hochwasserentlastungssystem
IBF	Institut für Boden- und Felsmechanik (Karlsruher Institut für Technologie)
IDR	Indonesische Rupiah, Landeswährung
IDS	IDS GmbH, Ettlingen
IfG	Institut für Geographie (Justus-Liebig-Universität Gießen)
IFG	Institut für funktionale Grenzflächen (Karlsruher Institut für Technologie)
IMB	Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Karlsruher Institut für Technologie)
IMG	Institut für Mineralogie und Geochemie (Karlsruher Institut für Technologie)
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (Karlsruher Institut für Technologie)
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (Karlsruher Institut für Technologie)
IWG-SWW	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Siedlungswasserwirtschaft (Karlsruher Institut für Technologie)
IWG-WK	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (Karlsruher Institut für Technologie)
IWRM	Integriertes Wasserressourcen-Management
i.A.	im Allgemeinen

i.d.R.	in der Regel
IDM	Induktiver Durchflussmesser
IPP	<i>Independent Power Producer</i>
JLU	Justus-Liebig-Universität Gießen
KaWaTech	Karstwassertechnologien
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KSB	Klein, Schanzlin, Becker
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
lpcd	<i>Liters per capita per day</i>
Max.	Maximum
MDG	<i>Millennium Development Goals</i>
MP3EI	<i>Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia</i>
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i>
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
NPSH₃	<i>Net Positive Suction Head</i> kavitationsbedingter Förderhöhenabfall 3 %
NPSH_A	<i>Net positive Suction Head Available</i>
NPSH_R	<i>Net Positive Suction Head Required</i>
n.v.	nicht verfügbar
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
OHG	Offene Handelsgesellschaft
O&M	<i>Operation and Maintenance</i>
PAT	Pumpe(n) als Turbine(n)
PD	<i>Pre-Design</i>
PDAM	<i>Perusahaan Daerah Air Minum</i>
PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation</i>
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PLN	<i>Perusahaan Listrik Negara</i>
PPP	<i>Public-Private-Partnership</i>
PROKASIH	<i>Program Kali Bersih</i>
P.T.	<i>Perseroan Terbatas</i>
PU	<i>Kementerian Pekerjaan Umum</i>
PV	Photovoltaik

QFD	Qualitätsfunktionendarstellung
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
RKV	Ringkolbenventil
RMM	Risikomanagementmethoden
SPALTEN	Problemlösungsverfahren (Akronym)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SST	<i>Sea Surface Temperature Anomaly</i>
TP	Teilprojekt
TRL	Theodor-Rehbock-Laboratorium
TZW	Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe
u.a.	unter anderem
UDM	Ultraschall-Durchflussmesser
UGM	Universität <i>Gadjah Mada, Yogyakarta</i> , Indonesien
UN	<i>United Nations</i>
UNICEF	<i>United Nations International Children's Emergency Fund</i>
usw.	und so weiter
VAG	Vereinigte Armaturen Gesellschaft
VBA	<i>Microsoft Excel Visual Basic for Applications</i>
VDE	Verein der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
WF	Wasserfußabdruck
WHO	<i>World Health Organization</i>
WP	<i>Workpackage</i>
WPS	Wasserkraftbetriebe(n) Pumpsystem(e)
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die tägliche Dusche, das sommerliche Wässern des Gartens oder die Autowäsche am Wochenende. Menschen, die mit einer gesicherten Wasserversorgung aufgewachsen sind, halten diese Tätigkeiten vermutlich für selbstverständlich, für alltäglich. Was sie in vielen Regionen der Erde aber nicht sind. Noch heute müssen Millionen Menschen teils stundenlange Wege auf sich nehmen, um Wasser für das tägliche (Über-) Leben zu beschaffen (WWAP, 2012). Laut UNESCO (2003) ist ein „*angemessener Zugang*“ zu Wasser als „*die Verfügbarkeit von mindestens 20 Liter pro Person und Tag von einer ausgebauten Quelle in einer Entfernung von maximal einem Kilometer vom Wohnsitz des Nutzers*“ definiert. Im Vergleich zu den Versorgungsmaßstäben in Industrienationen ein geradezu surrealer Wert, zumal diese Wassermenge lediglich auf die bloße Existenzsicherung abzielt ohne eine (initiale) wirtschaftliche Entwicklung der betroffenen Regionen zu begünstigen.

Die Gründe für mangelnde Wasserversorgung sind vielfältig. Bspw. können ungünstige naturräumliche Bedingungen zu zeitweisem oder gar dauerhaftem Mangel an Wasserressourcen führen. Diese „*physische Wasserknappheit*“ wird weiterhin verstärkt durch übergeordnete, nicht zu beeinflussende Mechanismen wie globales Bevölkerungswachstum, Migration und Klimaveränderungen (FAO, 2008). Eine unzureichende Trinkwasserversorgung ist jedoch nicht zwingend gleichbedeutend mit mangelhafter Ressourcenverfügbarkeit, sie kann auch hausgemacht sein durch begrenztes wirtschaftliches Potential, Mangel an geeigneten Technologien und/oder zugehörigem (Fach-) Wissen, durch anthropogene Eingriffe wie Gewässerverschmutzung, falsche Bewirtschaftung und Ressourcenverschwendung sowie durch mangelhafte institutionelle Strukturen oder unklare Zuständigkeiten (BMZ, 2006; VDI, 2008). Hieraus resultiert eine „*wirtschaftliche Wasserknappheit*“, welche die Nutzbarmachung vorhandener Ressourcen erschweren oder gar verhindern kann (FAO, 2008).

Häufig wird die Thematik „*Wasserknappheit*“ mit Entwicklungs- und Schwellenländern in Verbindung gebracht, da viele dieser Länder geografisch in wasserarmen Regionen liegen oder durch jährlich bzw. saisonal stark schwankenden Niederschlagsmengen geprägt sind (gtz, 2010). Zusätzlich wird in diesen Gebieten die Wasserversorgung erschwert durch eine i.d.R. defizitäre Infrastruktur im Wassersektor. Fehlende Wasserleitungen, Kläranlagen, Toiletten und Pumpen sowie ein Mangel an Fachkompetenz und an erforderlichen politischen Rahmenbedingungen für eine Verbesserung der Situation sind Beispiele für die technischen, gesellschaftlichen sowie administrativen Probleme, welche in den betroffenen Regionen häufig anzutreffen sind (gtz, 2010). Nicht selten sind die Gründe weniger vielfältig, da schlicht der Mangel an finanziellen Mitteln ursächlich ist für ausbleibende Verbesserungsmaßnahmen. So schätzt die Deutsche Bank *Research* (2011) den jährlichen globalen Investitionsbedarf im Wassersektor auf bis zu 500 Milliarden Euro.

1 Einleitung

Investitionen von mehreren Millionen oder gar Milliarden Euro können Entwicklungs- und Schwellenländer jedoch zumeist nicht alleine stemmen, weshalb sie zum einen auf Finanzierungshilfen aus wohlhabenderen Ländern bzw. auf die Unterstützung internationaler Institutionen (z.B. Weltbank, *Asian Development Bank* usw.) angewiesen sind. Zum anderen sind technologische Lösungen gefragt, welche auf flexiblen, robusten und nach Möglichkeit kostengünstigen Ansätzen basieren und eine Anpassung auf die naturräumlichen und soziologischen Bedingungen der Zielregion erlauben. Diese Forderung steht der noch bis vor wenigen Jahrzehnten geltenden Meinung entgegen, dass mangelnde Wasserversorgung mithilfe rein ingenieurtechnischer Ansätze bewältigt werden kann. Da Technologietransfermaßnahmen in der Dritten Welt jedoch häufig durch die zuvor genannten, teils unüberwindbaren Probleme gekennzeichnet waren, war ein Umdenken erforderlich (Klaphake und Scheumann, 2001). So erschwerten oder verhinderten fehlende finanzielle Mittel die Anschaffung technischer Anlagen und Maschinen oder der Umgang mit ausgeklügelten *High-Tech*-Lösungen führte zu einer technischen und/oder finanziellen Überforderung der lokalen Betreiber (Baumer, 1983).

Viele Länder bzw. Regionen konnten und können diese Hindernisse aufgrund mangelnden Problemlösungspotentials bzw. unzureichender Handlungskapazität nicht aus eigenem Antrieb überwinden (Klaphake und Scheumann, 2001). D.h. eine defizitäre gesellschaftliche Innovationsfähigkeit ist neben den zuvor genannten Einflussfaktoren häufig eine weitere Hauptursache für Wasserknappheit, nicht aber Wasserarmut im eigentlichen Sinne (Klaphake und Scheumann, 2001). Betroffen von diesem Defizit sind nicht nur Infrastrukturprojekte der öffentlichen Hand sondern auch Projekte in Zusammenarbeit von öffentlichen Einrichtungen mit privaten Unternehmen oder wissenschaftlichen Institutionen (BMZ, 2006). Missstände äußern sich bei der Projektplanung und -umsetzung u.a. durch das Fehlen adäquater Regel- und Normwerke sowie ungenügenden oder gänzlich fehlenden Daten als Planungsgrundlage (BMZ, 2006). Die Verteilung von Zuständigkeiten und Kompetenzen auf mehrere Behörden, erschwertes effizientes Handeln durch stark ausgeprägte Hierarchien sowie fehlende kompetente und motivierte Entscheidungsträger sind Stolpersteine, mit denen Technologie- und Projektplaner häufig konfrontiert werden.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Diskussionen über mögliche Lösungsansätze konzentrieren sich daher häufig auf die Frage, wie geeignete Strategien und Technologien beschaffen sein müssen und wie sie umgesetzt werden können, um unter den Bedingungen der Zielregion den Anforderungen der Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Dabei steht neben der Vermeidung negativer ökologischer oder ökonomischer Auswirkungen in der Gegenwart oder Zukunft die Anpassung der Entwicklung an die Bedürfnisse der heutigen Generation im Fokus. In diesem Zusammenhang begründete *Ernst Friedrich Schumacher* in seinem wegweisenden Buch *Small is Beautiful* die Forderung nach sogenannten „*intermediate technologies*“ (englisch: Angepasste Technologien) (Schumacher, 1973). Seinen Ausführungen zufolge kann eine erfolgreiche Anwendung von Technologien jedweder Art nur mit einer umfassenden Sichtweise erfolgen unter Berücksichtigung sämtlicher relevanter lokaler Randbedingungen aus den Bereichen Ökonomie, Ökologie und Soziologie. Entscheidendes Kriterium ist hierbei, dass diese Technologien hinsichtlich Umsetzung, Betrieb und Instandsetzung einfacher und kostengünstiger sind als Lösungen hochentwickelter Regionen. Zudem sollen sie ressourcenschonender als konventionelle Technologien sein, da diese in der Vergangenheit keine Verbesserung der Mangelsituation ermöglichten.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bereits seit fast zwei Jahrzehnten intensiv mit der Entwicklung und exemplarischen Implementierung angepasster Technologien zur Verbesserung der Wasserversorgungssituation in Karstgebieten Südostasiens (viele der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf Bedarfsregionen ohne verkarsteten Untergrund übertragen). So auch im Rahmen des deutsch-indonesischen Verbundvorhabens „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) Indonesien“, welches von deutscher Seite durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde.

Dieser Forschungsverbund konzentriert sich auf die nachhaltige Nutzbarmachung von Karstaquifereen in der Modellregion *Gunung Sewu*, welche an der Südküste der indonesischen Hauptinsel *Java* beheimatet ist. Die zumeist in der Landwirtschaft tätige Bevölkerung *Gunung Sewus* leidet insbesondere während der sechsmonatigen Trockenzeit unter extremem Wassermangel. Dies führt zu einer erheblichen Einschränkung der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung, wonach das Karstgebiet auch als „Armenhaus *Javas*“ bezeichnet wird (Nestmann et al., 2009). Zentrale Ziele des Verbundvorhabens waren daher die Stärkung einer nachhaltigen Entwicklung der Modellregion durch die Etablierung eines ganzheitlichen IWRM-Konzeptes in Verbindung mit der Entwicklung und exemplarischen Implementierung innovativer und hochanpassungsfähiger Technologien für alle Bereiche des Wassersektors. Diese F&E-Aktivitäten (Forschung und Entwicklung) boten den Rahmen zur Ausarbeitung der vorliegenden Dissertation.

Mithilfe des Engagements der deutschen und indonesischen Projektpartner aus Wissenschaft, Industrie und öffentlichen Einrichtungen konnte in der Region *Gunung Sewu* eine weltweit einzigartige Wasserförderanlage realisiert werden (Nestmann et al., 2009). Technologische Besonderheiten dieser Anlage sind der dauerhafte partielle Einstau eines unterirdischen Karstfließgewässers sowie der Einsatz eines energieautarken Wasserfördersystems, welches sich durch hohe Effizienz und Robustheit sowie durch vergleichsweise geringe Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten auszeichnet. Der Antrieb dieses „wasserkraftbetriebenen Pumpsystems“ (WPS) basiert auf der Nutzung des durch den Einstau geschaffenen Wasserkraftpotentials¹. Bedingt durch den Pilotcharakter der Anlage konnte bei deren Konzeption und Realisierung auf keinerlei Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden, wonach sich die Implementierung des Gesamtförderkonzeptes unter extremen naturräumlichen, technischen und soziologischen Bedingungen als hochiterativer Prozess darstellte.

Vor diesem Hintergrund liegt der Schwerpunkt dieser Dissertation auf der Ausarbeitung einer Methodik zur Dimensionierung und Implementierung eines WPS unter Berücksichtigung der jeweiligen standortspezifischen Rahmenbedingungen. Hierzu sollten mittels umfassender technischer und betrieblicher Analysen der Pilotanlage umfassende praktische Erfahrungen mit WPS gesammelt werden und als Basis zur Entwicklung der Implementierungsmethodik dienen. Unter dem Leitmotiv „*Es genügt eben nicht, daß Technik gut funktioniert. Sie muß auch in die Welt passen*“² sollten weiterhin betriebliche und administrative Aspekte berücksichtigt werden, um einen wissenschaftlichen und ingenieurstechnischen Beitrag für die dauerhafte Betriebsfähigkeit der Pilotanlage sowie für die Multiplizierbarkeit der eingesetzten Technologie leisten zu können.

¹ Besagte WPS wurden durch das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Kooperation mit dem Industriepartner KSB (Klein, Schanzlin, Becker) AG, Frankenthal, entwickelt und für die vorliegende Dissertationsschrift als Stand der Technik vorausgesetzt.

² Gero von Randow, Redakteur „Die Zeit“, http://www.zeit.de/1997/06/Rapid_am_Ende (16.12.2015)

1.3 Gliederung der Arbeit

Zu Beginn der in sieben Hauptkapitel unterteilten Dissertation steht deren thematische Einordnung in den Kontext der weltweit vielerorts anzutreffenden Wasserunterversorgung sowie innerhalb des F&E-Verbundes „IWRM Indonesien“, in dessen Rahmen die Arbeit entstand. In diesem Zusammenhang gilt es zunächst die Frage zu beantworten, welche Faktoren die räumlich und zeitlich zu differenzierenden Wassermengen sowie den Wasserbedarf bestimmen und somit die Unterversorgung begünstigen. Kapitel 2 konzentriert sich auf mögliche Antworten, welche unmittelbaren Einfluss auf die Entwicklung nachhaltiger technologischer Lösungen haben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den relevanten Einflussgrößen in Bezug auf die Wasserförderung unter anspruchsvollen naturräumlichen und soziologischen Bedingungen.

In Abhängigkeit von diesen standortspezifischen Bedingungen kann das Ziel einer nachhaltigen Wasserförderung mit hohen technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen einhergehen. Das dritte Kapitel beginnt daher mit einer Darstellung des aktuellen Technikstandes im Bereich der konventionellen Wasserförderung, was u.a. eine Betrachtung der hydraulischen Funktionsweise von Kreiselpumpen einschließt. Diese am häufigsten in der Wasserförderung eingesetzte Pumpenbauart ist weiterhin als zentraler Bestandteil der zuvor beschriebenen WPS zu nennen. Da neben der Fördermaschine auch das zugehörige Antriebsaggregat bzw. die Art der Energieversorgung gleichermaßen bedeutsam ist, werden im dritten Kapitel das große technisch-wirtschaftliche (z.B. Verzicht auf Treibstoffe) und ökologische Potential (emissionsfreier Betrieb) sowie betriebliche Risiken (u.a. Witterungseinflüsse bei Solar- und Windkraftanlagen) adressiert, welche mit Systemantrieben auf Basis regenerativer Energieformen einhergehen.

Sowohl die Entwicklung der WPS als auch die Implementierung einer Pilotanlage wurde durch den o.g. F&E-Verbund realisiert. Der nachhaltige Betrieb dieser Anlage erforderte erwartungsgemäß verschiedene technische und betriebliche Anpassungen, die maßgeblich im Rahmen der vorliegenden Arbeit entworfen und erfolgreich vor Ort umgesetzt wurden. Das vierte Kapitel thematisiert die Entwicklung und Implementierung sowie die umfassende betriebliche Analyse und Optimierung der Anlage.

Auf Basis der hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Methodik zur standortgerechten Entwicklung und nachhaltigen Implementierung von WPS entwickelt, welche durch geringfügige Anpassung auch bei Planung und Umsetzung weiterer Teilsysteme der Gesamtanlage Anwendung finden kann. Dieser Lösungsansatz für Technologietransfervorhaben unter extremen Bedingungen wird im fünften Kapitel eingehend vorgestellt.

Nachdem in den vorausgehenden Kapiteln die pilothafte Realisierung eines WPS sowie die Entwicklung des Ansatzes zur optimierten Technologieimplementierung beschrieben wurden, wird im sechsten Kapitel die Frage nach geeigneten Multiplikationsstrategien erörtert.

Im siebten und abschließenden Abschnitt werden die Ausführungen der vorausgegangenen Kapitel zusammengefasst und die Kernaussagen der Dissertationsschrift kompakt dargestellt. Weiterhin enthält das Kapitel einen Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte an die vorliegende Arbeit.

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

2.1 Wasser-Energie-Nexus

Für den Ausbau-, Funktions- und Nutzungsgrad in der Trink- und Brauchwasserversorgung einer Region gibt es vielfältige Hemmnisse und Treiber, von den naturräumlichen Randbedingungen wie (saisonal schwankenden) Ressourcenvorkommen, Topographie und Hydrogeologie, über die Verfügbarkeit von Wissen, Technologie und Energie bis hin zur Finanzkraft privater oder öffentlicher Versorger. Erhebliche Unterschiede in Bezug auf die technische und ökonomische Realisierbarkeit einer nachhaltigen Wasserversorgung sind sowohl zwischen Industriestaaten, Schwellen- und Entwicklungsländern als auch zwischen urbanen und ruralen Gebieten gegeben. Ein zentraler Aspekt ist in diesem Zusammenhang der so genannte Wasser-Energie-Nexus.

Wasser und Energie – die gegenseitige Abhängigkeit dieser untrennbar mit der menschlichen Existenz verbundenen Begriffe ist als sogenannter Wasser-Energie-Nexus bekannt, welcher die Wechselbeziehung zwischen Wasserbedarf in der Energieerzeugung und dem Energiebedarf in der Wasserversorgung beschreibt. Vor dem Hintergrund prozessspezifischer Wasser- und Energiebedarfsmengen in allen Sektoren (Landwirtschaft, Industrie usw., siehe Kapitel 2.2) stellt die nachhaltige Beherrschbarkeit dieser Wechselbeziehung eine der größten Herausforderungen der Zukunft dar.

Grundsätzlich wird Energie in allen Bereichen des Wassersektors benötigt, wenngleich i.d.R. der größte Anteil auf die Förderung entfällt (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Der hierfür benötigte Energieaufwand ist in hohem Maße standortabhängig und wird maßgeblich durch die Lage (bzw. Tiefe), die Zugänglichkeit sowie durch die mengenbezogene Größe der Quelle bestimmt. Aufgrund dieser Einflussgrößen liegt der spezifische Energieeinsatz in der Grundwasserversorgung im Mittel um ca. 30 % höher als bei Oberflächengewässern, wonach die prozentualen Anteile von Oberflächen- und Grundwasserförderung stark standortabhängig sind (Goldstein und Smith, 2002). So beträgt der Anteil der Grundwasserförderung in einem Land wie Kanada, welches reich an Oberflächengewässern ist, nur 2 %; in der Schweiz hingegen aufgrund der topografischen Gegebenheiten ca. 80 %. In Europa werden im Durchschnitt zwei Drittel des Trinkwassers aus Grundwasserquellen bezogen, in Deutschland liegt der Anteil je nach Schätzung zwischen 65 und 74 %. Insbesondere sogenannte *Mega Cities*, großflächige urbane Siedlungen mit mehreren Millionen Einwohnern (siehe Kapitel 2.4.1), decken ihren Frischwasserbedarf fast ausschließlich durch die Erschließung von Grundwasservorräten wodurch teils erhebliche ökologische und ökonomische Probleme entstehen. (UFZ, 2011)

Da die Neubildung von Grundwasservorräten ebenfalls stark standortabhängig ist, kann diese Ressource nicht bis zur Erschöpfung der Quellen entnommen werden, sondern muss als „Bestandteil und Regelgröße des Bodenwasserhaushalts“ gesehen werden (Grobosch, 2003). Auch können das Grundwasserdargebot sowie die Neubildungsrate nur unwesentlich durch

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

anthropogene Maßnahmen beeinflusst werden. Ist die Neubildungsrate hoch, weisen diese Vorkommen Eigenschaften einer (langsam) erneuerbaren Ressource auf (UFZ, 2011). Daher kann grundsätzlich selbst eine intensive Bewirtschaftung von Grundwasservorräten den Anforderungen einer nachhaltigen Ressourcennutzung genügen, sofern langfristig das Gleichgewicht zwischen Entnahme und Neubildung beachtet wird. Jedoch kommt es vielerorts aufgrund teils exzessiver Nutzung bzw. Übernutzung zur Absenkung des Grundwasserspiegels, wodurch nicht nur die spezifischen Förderkosten deutlich gesteigert werden (Grobosch, 2003). Weiterhin weisen Grundwasserressourcen aufgrund ihrer Lage im Untergrund eine Vulnerabilität gegenüber Kontamination auf, wodurch eine Abhängigkeit der Wasserqualität von der Geologie des Untergrunds besteht. Dies führt bspw. in Karstregionen zu teils erheblicher Belastung der unterirdischen Ressourcen durch anthropogene Eingriffe (siehe Kapitel 2.3.3).

Unabhängig von der Lage der Wasserressourcen schließt sich der Förderung i.d.R. eine Aufbereitung der Wassermengen an, deren technischer, energetischer und letztlich ökonomischer Umfang beeinflusst wird durch die Art und Schwere der Verunreinigung, die verfügbaren Technologien sowie die nationalen Trinkwasserverordnungen. In Tabelle 2.1 sind beispielhaft produktionsspezifische Energiemengen dargestellt, die mittels *Life Cycle Assessment* (LCA, englisch: Ökobilanz) für die USA bestimmt wurden. Diesen Werten zufolge bedingt die Nutzbarmachung von Oberflächengewässern durchschnittlich einen um mehr als 60 % geringeren energetischen Aufwand als die Erschließung von Grundwasservorräten. Hingegen liegt der mit der Behandlung von Abwässern zusammenhängende Energieaufwand je nach Verfahren um 60 bis 300 % höher als in der Grundwasserversorgung. Noch erheblich höher liegen die Energiemengen, die für die Entsalzung von Grund- oder Meerwasser benötigt werden. (WWAP, 2012)

Tabelle 2.1: Mittlere Wasserproduktionskosten in den USA (WWAP, 2012)

Quelle	Energieverbrauch (kWh 10^{-6} l ⁻¹) [*]
Oberflächenwasser	60
Grundwasser	160
Salzhaltiges Grundwasser	1.000 – 2.600
Meerwasser	2.600 – 4.400
Abwasserbehandlung	250 – 500

Insbesondere in stark ländlich geprägten, infrastrukturell schlecht erschlossenen Regionen ergeben sich große Herausforderungen bei der Energiebereitstellung für die Wasserversorgung. Hinsichtlich der Erzeugung elektrischer Energie sowie im Hinblick auf die Förderung vorhandener Wasserressourcen stellen dezentrale Konzepte vielversprechende Ansätze dar (Falkenmark et al., 1989). Hierbei steht insbesondere die Nutzung regenerativer Energien im Fokus zur Gewährleistung der technischen und infrastrukturellen Unabhängigkeit sowie der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit der technischen Einrichtungen. Doch ist die Nutzung erneuerbarer Energien, ebenso wie bei jeder konventionellen Energieform, gemäß des Wasser-Energie-Nexus' mit einem prozessspezifischen Wasserbedarf verbunden, sei es zur Gewinnung von Rohstoffen für die benötigten Maschinen und Komponenten, zum Anbau von Nutzpflanzen für Biokraftstoffe oder zum Antrieb von Wasserkraftmaschinen.

Zusätzlich ergeben sich weitere Erschwernisse für das Energie- und Wassermanagement durch externe Treiber wie bspw. die steigende Weltbevölkerung sowie der zunehmende Lebensstandard (siehe Kapitel 2.4.1), welche vorwiegend in Nicht-OECD-Staaten (*Organization for Economic Co-operation and Development*, deutsch: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) wie China und Indien verzeichnet werden. (WWAP, 2012)

So ist laut *U.S. Energy Information Administration* (EIA, deutsch: Amt für Energiestatistik innerhalb des US-amerikanischen Energieministeriums) im Zeitraum von 2007 bis 2035 eine Zunahme des globalen Energiebedarfs um 49 % zu erwarten. Die prognostizierten Steigerungsraten unterscheiden sich dabei deutlich zwischen 84 % in Nicht-OECD-Ländern und 14 % in OECD-Mitgliedsstaaten. Neben den Preistrends für verschiedene Primärenergieträger (natürlich vorkommende Energieformen wie Rohöl, Erdgas, Wind- oder Wasserenergie, sofern sie noch keine anthropogene Veränderung erfahren haben) wird letztlich auch der prozessspezifische Wasserbedarf bei der Energiegewinnung vielerorts zu einer Veränderung der Energiezusammensetzung führen. (EIA, 2010)

Seit Jahrzehnten stellt Erdöl den größten Anteil aller Primärenergieträger. Prognosen zufolge wird dies auch bis ins Jahr 2035 – und vermutlich auch darüber hinaus – der Fall sein. Wasser wird bei verschiedenen Prozessschritten während der Förderung und Verarbeitung des Erdöls benötigt, wodurch sich die Bedarfsmenge auf 1,058 m³ pro Gigajoule (1 GJ entspricht 32,6 bis 41,8 l Erdöl) beläuft. Dieser Wert stellt jedoch eine Untergrenze dar, da je nach Komplexität der Förderbedingungen der Bedarf auf das 2,5- bis 4-fache ansteigen kann. (UNESCO-IHE, 2008)

Hinsichtlich des weltweiten Verbrauchs an Primärenergieträgern steht Kohle heute und voraussichtlich auch in Zukunft an zweiter Stelle – jedoch werden deutlich höhere Steigerungsraten als beim Erdöl erwartet, wodurch die prognostizierten Mengenanteile für diese beiden Energieträger für das Jahr 2035 auf nahezu gleichem Niveau liegen werden. Der spezifische Wasserverbrauch des Kohleabbaus ist zwar stark abhängig von der Abbautiefe, kann jedoch mit durchschnittlich 0,164 m³ pro Gigajoule (1 GJ entspricht 30,6 bis 40 kg Kohle) angegeben werden. (UNESCO-IHE, 2008)

Untersuchungen zufolge werden in den kommenden Jahren die größten Zuwachsraten beim Erdgas erwartet. Hierbei unterscheiden sich die Wasserbedarfsmengen deutlich zwischen konventionellen Verfahren und dem seit einigen Jahren kontrovers diskutierten *Fracking*, auch *Hydraulic Fracturing* genannt (SRU, 2013). Das *Fracking*-Verfahren (deutsch: Hydraulisches Risserzeugen) sieht das Einpressen großer Wassermengen in das Erdreich unter hohem energetischem Aufwand und hydraulischen Drücken von mehreren Hundert Bar vor. Ziel ist es, das Gasflussverhalten innerhalb dichter Gesteinsschichten durch das Erzeugen kontrollierter künstlicher Risse zu verbessern. Konventionelle Verfahren weisen einen vergleichsweise moderaten Wasserverbrauch von durchschnittlich 0,109 m³ pro Gigajoule (1 GJ entspricht 26,5 bis 44,6 m³ Erdgas) auf (UNESCO-IHE, 2008). Das *Fracking*-Verfahren, das in den kommenden Jahren insbesondere in Nordamerika, China, Indien und Australien weiter an Bedeutung gewinnen könnte, führt definitionsgemäß zu einem deutlich höheren und stark standortspezifischen Wasserverbrauch (SRU, 2013).

Wenngleich die Kernkraftnutzung substantielle Nachteile birgt (z.B. Endlagerung radioaktiver Abfälle), so ist sie in Bezug auf den spezifischen Wasserverbrauch mit 0,086 m³ pro Gigajoule deutlich verbrauchsgünstiger als alternative Formen der Energiegewinnung. Nicht zuletzt aufgrund von Nuklearkatastrophen in Tschernobyl, Ukraine, und Fukushima, Japan, ist der Energiemixanteil der Kernkraft jedoch in vielen Staaten rückläufig. (UNESCO-IHE, 2008)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Auch im Bereich regenerativer Energien unterscheidet sich der Wasserbedarf teils erheblich je nach Primärenergieträger sowie in Abhängigkeit vom Entstehungsort. Grundsätzlich nimmt die Wasserkraft im Bereich regenerativer Energien die Spitzenposition in Bezug auf die installierte Leistung ein. Mehr als 15 % der globalen elektrischen Energieerzeugung wird durch Laufwasser-, (Pump-) Speicher-, Gezeiten-, Gletscher- oder Wellenkraftwerke realisiert. Je nach Schätzung liegt das Verhältnis von installierter zur technisch-wirtschaftlich nutzbaren Leistung bei 20 bis 33 %. Wasserkraft gilt in Bezug auf den prozessspezifischen Wasserverbrauch als „verlustfreie“ Art der Energiegewinnung, da dem Wasser lediglich Energie entzogen, die genutzte Menge aber vollständig rückgeführt wird. Einzig die im Falle künstlicher Speicherbecken durch Verdunstung verloren gehende Menge wird als Verbrauch betrachtet. Hinsichtlich des mit der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserkraft verbundenen Wasserverbrauchs sind in der Literatur Werte von 0,72 bis 1,5 m³ pro Gigajoule (2,6 bis 5,4 m³ MWh⁻¹) zu finden. Dieser „Verbrauch“ ist jedoch lediglich auf Verdunstungsprozesse, die durch den anthropogenen Eingriff in die Natur entstehen, und nicht auf die Energiegewinnung selbst zurückzuführen. (WWAP, 2012)

Bei der Erzeugung von Biomasse ist die Berechnung spezifischer Wasserverluste unpräzise, da sowohl die Pflanzenart als auch der Standort und die Art der Aufzucht einen erheblichen Einfluss auf den Wasserbedarf haben und somit die Ermittlung eines Durchschnittswerts nicht sinnvoll ist. Beispielsweise liegt in den Niederlanden bei der Erzeugung von Biomasse der Wasserbedarf bei 24 m³, in Zimbabwe hingegen bei 143 m³ pro Gigajoule. (UNESCO-IHE, 2008)

Der Beitrag von Wind- und Photovoltaikanlagen zur globalen Gesamtenergieerzeugung beträgt ca. 3 %. Bei beiden Technologien ist der prozessbedingte Wasserverbrauch vernachlässigbar und kommt fast ausschließlich durch Wasser zur Reinigung zustande. Bei Photovoltaikanlagen ist der Reinigungsbedarf jedoch vom Standort abhängig, da Verunreinigungen zu Wirkungsgradeinbußen führen können. Im Falle solarthermischer Kraftwerke erfolgt die Energieerzeugung analog zu den Prozessen in thermischen Kraftwerken (s.u.), wodurch ein Wasserverbrauch (z.B. für Kühlzwecke) von ca. 0,3 m³ pro Gigajoule angegeben werden kann. (WWAP, 2012)

Nach der Gewinnung werden Primärenergieträger im Zuge ihrer Weiterverarbeitung, der „Veredelung“, durch eine Vielzahl verschiedener Prozesse in Sekundärenergieträger (z.B. Heizöl, Briketts, Biogas, aufbereitetes Uran, usw.) bzw. in Sekundärenergie (z.B. elektrische Energie, mechanische Energie) überführt. Dabei werden fast 80 % der weltweit erzeugten elektrischen Energie in thermischen Kraftwerken generiert. Art und Häufigkeit der hierbei angewandten Prozesse hängen stark von den lokal verfügbaren technischen und wirtschaftlichen Mitteln ab, generell dominieren jedoch die Dampfkraftwerke. Die gängigsten Kraftwerkstypen sind kohlebefeuerte Kraftwerke, Gasturbinen (bevorzugt mit Erdgas betrieben), Kernkraftwerke sowie Kombianlagen, auch Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD) genannt, bei denen mit heißen Abgasen einer Gasturbine ein Dampfkraftwerk beschickt wird. (Zahoransky, 2002)

In Dampfkraftwerken wird Wasser, unabhängig von der Art der Befeuerung, als Arbeitsfluid des thermodynamischen Kreisprozesses, als Kühlwasser im Kondensator, Rückkühlwasser bei Kühlturbetrieb sowie ggf. als Wärmeträger für Heizwärme eingesetzt. Neben der Art des Prozesses hängen die erforderlichen Mengen noch von Umgebungs- und Wassertemperatur, relativer Luftfeuchte sowie von der baulichen bzw. leistungsbezogenen Größe des Kraftwerks ab. Bei sogenannten „geschlossenen Prozessen“ können gegenüber offenen Verfahren bis zu 95 % der benötigten Wassermenge durch internes Rezirkulieren eingespart werden (WWAP, 2012). Wenngleich offene Prozesse größere Wassermengen erfordern, so geht doch nur ein geringer

Teil durch Verdunstung effektiv verloren, der Rest wird nach Gebrauch und umfassender Wiederaufbereitung in das Entnahmegewässer rückgeführt. Bei geschlossenen Prozessen hingegen geht die genutzte Wassermenge dem Entnahmegewässer durch Verdunsten unwiederbringlich verloren. In Deutschland sind mehr als 60 % und somit der Großteil des jährlichen bundesweiten Wasserbedarfs auf den Einsatz in thermischen Kraftwerken (z.B. Kühlung, Arbeitsfluid, usw.) zurückzuführen (VDI, 2008). Trotz des Einsatzes verbesserter Technologien mit zunehmend effizienter Betriebsweise wird der mit der Energiegewinnung verbundene Wasserbedarf aufgrund des o.g. zunehmenden weltweiten Energiebedarfs stetig ansteigen. Laut Prognosen ist bei gleichbleibenden prozessspezifischen Verbrauchsanteilen bis ins Jahr 2050 eine Zunahme des Wasserbedarfs von 11,2 % zu erwarten (WWAP, 2012).

Aufgrund der ungleichen räumlichen Verteilung nutzbarer Wasserressourcen sowie dem regional ungleich steigenden Bedarf an Frischwasser ist künftig hinsichtlich der Wasserversorgung der Bevölkerung sowie im Hinblick auf die Energieerzeugung mit noch stärker ausgeprägten sozio-ökonomischen Einflüssen zu rechnen. Beispielsweise müssen Länder wie China, Indien sowie Staaten des Nahen Ostens, welche bereits heute unter Wasserknappheit bzw. -mangel leiden, aufgrund der deutlich steigenden Nachfrage nach elektrischer Energie ihre Kapazitäten erheblich ausbauen, um den Bedarf der Bevölkerung, öffentlicher Einrichtungen sowie der Industrie künftig decken zu können (WWAP, 2012).

2.2 Wasserbedarf vs. Wasserverfügbarkeit

Um eine bereichsspezifische Bewertung des Wasserbedarfs bzw. des Wasserverbrauchs zu ermöglichen, können sämtliche anthropogenen und natürlichen Prozesse in die Sektoren menschliche Siedlungen, Landwirtschaft, Industrie und Energiewirtschaft sowie Ökosysteme unterteilt werden (siehe Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Unterteilung von anthropogenen und natürlichen Prozessen in die Sektoren (von oben im Uhrzeigersinn) menschliche Siedlungen, Landwirtschaft, Industrie und Energiewirtschaft sowie Ökosysteme

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Als Ergänzung zur nachfolgenden Kurzbeschreibung dieser Sektoren werden zunächst verschiedene Begriffe eingeführt, welche bedeutsam sind zur Beschreibung des sektorspezifischen Wasserverbrauchs bzw. -bedarfs.

Virtuelles Wasser und Wasserfußabdruck

Der Wasserverbrauch einer Person bzw. einer Region ist eine komplex darzustellende Größe. Als gebräuchlicher Berechnungsansatz wird heute der durch den britischen Wissenschaftler *John Anthony Allan* entwickelt Terminus des „virtuellen Wassers“ verwandt. Dieser beschreibt die Wassermenge, welche im Laufe des Herstellungsprozesses eines bestimmten Nahrungsmittels, Produkts oder durch eine Dienstleistung verbraucht oder verunreinigt wird. (WWF, 2009)

Eine Weiterentwicklung des Konzepts des virtuellen Wassers ist der so genannte „Wasserfußabdruck“ durch den niederländischen Wissenschaftler *Arjen Y. Hoekstra*, Universität *Twente*, Niederlande, in Zusammenarbeit mit der *Non-Profit-Organisation Water Footprint Network* (Hoekstra und Mekonnen, 2012; WWF, 2009). Definitionsgemäß setzt sich der Wasserfußabdruck aus der Summe zweier Teilmengen zusammen.

Zum einen aus dem direkten Wasserverbrauch, also der Wassermenge, die für Tätigkeiten des täglichen Lebens (z.B. Kochen, Körperpflege usw.) benötigt wird (siehe Abbildung 2.2). Zum anderen aus dem so genannten indirekten Wasserverbrauch, welcher durch Güterproduktion oder durch Dienstleistungen verursacht wird. Dieser indirekte Wasserverbrauch lässt sich weiter in einen internen (Produkte oder Dienstleistungen aus der betrachteten Region) und einen externen Anteil (Produkte oder Dienstleistungen von außerhalb der betrachteten Region) untergliedern. Der Wasserfußabdruck enthält demnach nicht nur Informationen über die Höhe des Wasserverbrauchs, sondern auch eine regionale Komponente in Bezug auf den Entstehungsort des Verbrauchs sowie hinsichtlich des Ortes, an dem das Produkt bzw. die Dienstleistung in Anspruch genommen wird. Die Berechnung des Wasserfußabdrucks kann demnach für eine Einzelperson, ein Unternehmen oder eine Region erfolgen (WWF, 2009).

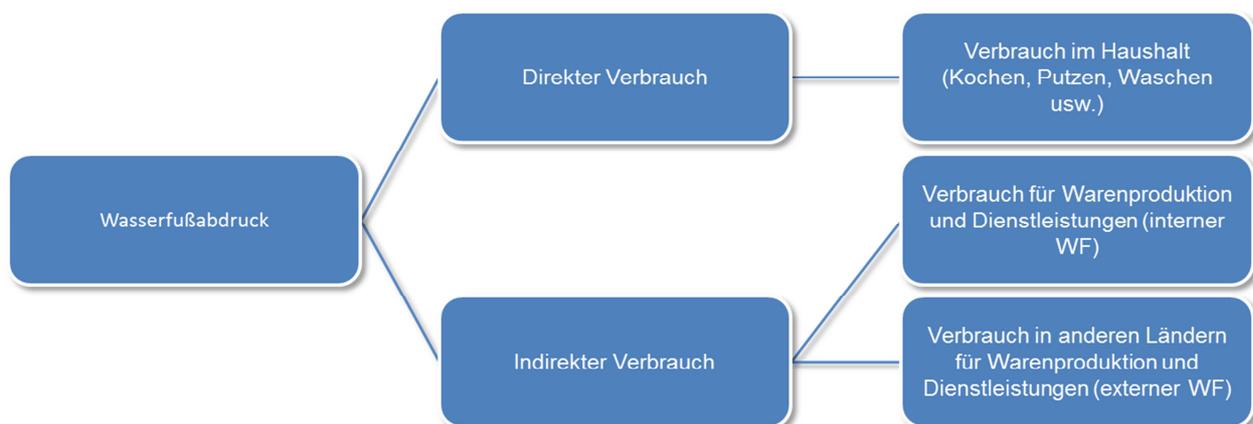


Abbildung 2.2: Schema der Zusammensetzung des Wasserfußabdrucks (WF), verändert nach WWF (2009)

Durch den externen Wasserfußabdruck können insbesondere wirtschaftlich besser gestellte Regionen erheblichen Einfluss auf das Wassermanagement bzw. die Priorisierung in der Wasserversorgung einer Region nehmen, welche sich durch die Produktion wasserintensiver Waren und/oder durch (verbrauchsintensive) Dienstleistungen auszeichnet. Grundsätzlich wird bei der Überschreitung der verfügbaren Wassermenge durch den Bedarf von Wasserknappheit

oder gar von (akutem) Wassermangel gesprochen. Zwar gibt es keine einheitliche Definition der beiden Begriffe, jedoch zwei bevorzugte Betrachtungsweisen, die sich am Konzept des Wasserfußabdrucks orientieren (VDI, 2008).

Wasserknappheit und Wassermangel

In der Hydrologie werden die genannten Begriffe durch die Relation von Bevölkerungszahl zu verfügbarer Menge an erneuerbarem Wasser (demographische Dimension) definiert (VDI, 2008; Klaphake und Scheumann, 2001). Bei Unterschreitung der empirisch ermittelten Grenze von 1.700 m³ pro Person und Jahr (entspricht 4,7 m³ pro Kopf und Tag) würde von Wasserknappheit, bei Unterschreitung von 1.000 m³ (entspricht 2,7 m³ pro Kopf und Tag) von Wassermangel gesprochen, unterhalb von 500 m³ pro Person und Jahr (entspricht 1,4 m³ pro Kopf und Tag) gar von extremem bzw. akutem Wassermangel (Falkenmark et al., 1989; VDI, 2008). Stehen den Menschen einer Region weniger als 1.000 m³ pro Kopf und Jahr zur Verfügung, ist laut dieser Definition mit Einschränkungen der Gesundheit sowie mit einer verminderten Wirtschaftsleistung der Region zu rechnen. Diesem Ansatz zufolge herrschte im Jahr 1990 weltweit in 20 Ländern Wassermangel, bis zum Jahr 2025 werden bis zu 15 weitere hinzukommen.

Der seitens der UN-Kommission entwickelte „relative Wasserstress-Index“ ist ein weiterer gebräuchlicher, mehr verbrauchsorientierter Indikator (technische Dimension) (VDI, 2008; Klaphake und Scheumann, 2001). Dieser Indikator beschreibt das Verhältnis von Wasserverbrauch zu vorhandenen erneuerbaren Wasserressourcen. Hiernach sind Länder von einem mittleren bis hohen Wasserstress betroffen, wenn jährlich mehr als 20 % des gesamten erneuerbaren Süßwasservorrats entnommen werden (Klaphake und Scheumann, 2001). Bei mehr als 40 % gilt die Region als von eindeutig hohem Wasserstress betroffen. Ausgehend von diesem Berechnungsansatz werden bis ins Jahr 2025 Prognosen zufolge fast 50 % der afrikanischen Bevölkerung in von Wasserstress betroffenen Ländern leben (VDI, 2008).

Wasserverbrauch in menschlichen Siedlungen

Grundsätzlich können mithilfe der Konzepte des virtuellen Wassers sowie des Wasserfußabdrucks eine umfassende Bilanzierung der Verbrauchsmengen in einer Region sowie die Darstellung von Abhängigkeiten zwischen einzelnen Regionen erfolgen. Um jedoch veranschaulichen zu können, welche Mindestmenge für die Existenzsicherung eines Menschen erforderlich ist, wurde im Rahmen des *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Reports* der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und des UN-Kinderhilfswerks (UNICEF) ein angemessener Zugang zu Wasser definiert als „die Verfügbarkeit von mindestens 20 Liter pro Person und Tag von einer ausgebauten Quelle in einer Entfernung von maximal einem Kilometer vom Wohnsitz des Nutzers“ (UNESCO, 2003).

Da dieser Wert die absolute Untergrenze für den häuslichen Gebrauch darstellt, wird der Bereich von 20 bis 50 Liter pro Kopf und Tag (englisch: *Liters per capita per day*, lpcd) als sinnvolle Zielgröße bei Wasserversorgungsprojekten in Mangelregionen erachtet. Im internationalen Vergleich wird der Kontrast zwischen Industrieländern und Schwellen-/Entwicklungsländern deutlich. So verbrauchen bspw. Bewohner der USA im täglichen Mittel 575 Liter Wasser, in Mosambik liegt der Durchschnitt bei lediglich vier Litern. In Deutschland liegt der häusliche Wasserverbrauch bei 193 lpcd (gtz, 2010).

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Generell spielt das Verbrauchsverhalten im privaten Haushalt eine bedeutende Rolle im Hinblick auf einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser. In vielen Ländern und Regionen werden verbrauchsarme Installationen sowie sparsame Haushaltsgeräte immer populärer. Deren Anschaffung bzw. Verwendung hängt jedoch stark von den finanziellen und technischen Möglichkeiten sowie dem Bewusstsein der Menschen für diese Thematik ab. Jedoch bedeutet ein hohes durchschnittliches Einkommen nicht automatisch, dass ein solches Bewusstsein vorhanden ist bzw. dass der Verbrauch privater Haushalte niedriger ist als in ärmeren Regionen (siehe o.g. Verbrauchsmengen in USA, Mosambik und Deutschland). (VDI, 2008)

Der heutige Anteil des häuslichen Wasserverbrauchs nimmt 10 % der globalen Wasserentnahme bzw. 3,6 % des weltweiten Wasserfußabdrucks ein (gtz, 2010; Hoekstra und Mekonnen, 2012). Jedoch hängen auch in diesem Sektor die realen Werte sowie Trends für die Zukunft stark von den Standortfaktoren der betrachteten Region ab. So wird der prognostizierte Zuwachs von mehr als 2 Milliarden Menschen bis ins Jahr 2050 hauptsächlich in Schwellen- und Entwicklungsländern bzw. in bislang strukturschwachen Regionen erwartet (siehe Kapitel 2.4.1) (Alwardt, 2011). Da diese Regionen bereits heute unter Wasserknappheit bzw. -mangel leiden, wird sich die Situation tendenziell verschlimmern, sofern keine geeigneten Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Grundsätzlich wird der nachhaltige Umgang mit Wasserressourcen erschwert, da in vielen Ländern die Wasserpreise subventioniert werden, wodurch die realen Kosten nicht an die Endnutzer weitergegeben werden. Somit fehlen insbesondere in der verbrauchsintensiven Landwirtschaft Anreize für einen sparsameren Ressourcenumgang (WWF, 2009).

Landwirtschaft

Wenngleich sich die absoluten Verbrauchsmengen zwischen Industrienationen sowie Schwellen- und Entwicklungsländern teils erheblich unterscheiden, so gibt es doch Gemeinsamkeiten in Bezug auf Mengenanteile der einzelnen Sektoren. Die Produktion landwirtschaftlicher Güter verbraucht in den meisten Regionen der Welt den mit Abstand größten Anteil (Hoekstra und Mekonnen, 2012). Hiernach beträgt der Verbrauchsanteil der Landwirtschaft im globalen Durchschnitt 70 %, je nach Aridität der Region gar bis zu 95 % (Deutsche Bank *Research*, 2011; gtz, 2010). In den BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China) liegt der landwirtschaftliche Verbrauch im Schnitt bei 74 %, wobei das Spektrum von 20 % in Russland bis hin zu 87 % in Indien reicht (WWAP, 2012). In OECD-Ländern hingegen wurde ein Durchschnitt von vergleichsweise geringen 44 % ermittelt, in einzelnen Mitgliedsstaaten der Organisation jedoch auch über 60 % (WWAP, 2012). In Deutschland ist der Anteil der landwirtschaftlichen Wasserentnahmen aufgrund der vorteilhaften Standortfaktoren sehr gering und beträgt lediglich 0,6 % der genutzten Gesamtwassermenge (UBA, 2013).

Grundsätzlich gibt es je nach Region präferierte Nahrungsmittel, deren Anbau im Fall eines hohen spezifischen Wasserbedarfs zur Verstärkung der lokalen bzw. regionalen Wasserknappheit führen kann. Beispielsweise ist ca. die Hälfte der Weltbevölkerung auf Reis als Grundnahrungsmittel angewiesen. Je nach Anbaumethode wird eine Wassermenge zwischen 3.000 und 5.000 Liter pro Kilogramm Reis benötigt (siehe Abbildung 2.3). Zum Vergleich: Beim Anbau der ebenfalls wasserintensiven Nahrungsmittel Mais und Weizen wird lediglich ein Fünftel der für den Reisanbau erforderlichen Wassermenge benötigt. Da mehr als 90 % der weltweit produzierten Reismenge in Asien angebaut werden, ist eine enorme Belastung des Wasserhaushalts der Anbauregionen zwangsläufig. Global betrachtet entfallen bereits heute 85 % der jährlichen landwirtschaftlichen Wasserentnahme auf den Reisanbau. (WWF, 2009)



Abbildung 2.3: Wasserintensiver Reisanbau am Beispiel Tansania³ (links), Bewässerungswirtschaft in ariden Regionen⁴ (rechts)

Künftig ist mit einem höheren Verbrauchsanteil der Landwirtschaft zu rechnen, da durch eine klimabedingte Ausweitung der globalen Wasserknappheit (siehe Kapitel 2.3.2) sowie durch eine mit dem Bevölkerungswachstum (siehe Kapitel 2.4.1) einhergehende steigende Nachfrage an Nahrungs- und Futtermitteln die Bewässerungswirtschaft als verbrauchsintensive Form der Agrarwirtschaft weiter an Bedeutung gewinnen wird. Darüber hinaus wirkt insbesondere in aufstrebenden Volkswirtschaften der zunehmende Wohlstand sowie die sich damit ändernden Ernährungsgewohnheiten (z.B. mehr Fleisch) als zusätzlicher Treiber (WWAP, 2012; Deutsche Bank *Research* 2011). In diesem Zusammenhang haben Studien gezeigt, dass bis zum Jahr 2050 mit einer Steigerung des landwirtschaftlichen Anteils am globalen Gesamtwasserverbrauch um bis zu 14 % auf 84 % zu rechnen ist (WWAP, 2012). Bereits heute sind ca. 40 % der weltweiten landwirtschaftlichen Erträge auf Bewässerungsfeldbau zurückzuführen (Deutsche Bank *Research*, 2011). In Deutschland werden lediglich 3 % der Anbaufläche zur Ertragssicherung künstlich bewässert, in China hingegen 35 % (Brunner, 2011).

Ein Ansatzpunkt zur Verbrauchsreduzierung in der Landwirtschaft ist das Ersetzen alter und ineffizienter Bewässerungsmethoden durch moderne Systeme. Weiterhin können bspw. mithilfe von nanotechnologischen oder biologischen Innovationen (z.B. Stickstofffixierung, Erhöhung der Stresstoleranz von Pflanzen usw.) deutliche Einsparungen an Düngemittel erzielt werden. Dies führt zu einer Entlastung der Grundwasseraquifere sowie zu einer deutlichen Reduzierung des Aufwands bei der Wasseraufbereitung. Einige der genannten Technologien stellen hohe technische und wirtschaftliche Anforderungen an die Anwender und sind somit nur bedingt für den Einsatz in entlegenen bzw. infrastrukturell schwachen Regionen geeignet. (VDI, 2008)

Industrie und Energiewirtschaft

Die industriebedingte Wasserentnahme setzt sich aus dem realen Verbrauch (Nutzwasser) und den rückgeführten Abwasserströmen (Betriebswasser) zusammen. Letztere liegen um ein Vielfaches höher, wonach ein geeignetes Wasser-/Abwassermanagement von entscheidender Bedeutung ist für eine nachhaltige Ressourcennutzung (WWAP, 2012). Weltweit nimmt der Wasserbedarf aus Industrie und Energiewirtschaft einen Anteil von ca. 20 % der Gesamtwasserentnahme bzw. 4,4 % des Gesamtwasserfußabdrucks ein, wobei ca. 50 % der

³ <http://www.nachhaltige-entwicklung.uni-bonn.de/nachhaltig-nachgefragt-1/reisanbau> (18.07.2015)

⁴ http://img.geo.de/div/image/54993/01_wuesten_bewaesserung_pop.jpg (18.07.2015)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

jährlichen industriebedingten Wasserentnahme auf Nordamerika und Europa entfallen (Hoekstra und Mekonnen, 2012; Deutsche Bank *Research*, 2011). Insbesondere China sowie weitere asiatische Staaten verzeichnen in ihrer Eigenschaft als Niedriglohnländer einen steten Zuwachs von Produktionsstätten ausländischer Unternehmen, wodurch auch künftig mit einer kontinuierlichen Zunahme des lokalen Wasser- und Energieverbrauchs sowie des Exportanteils gerechnet werden kann – denn weltweit gesehen ist mit 41 % bereits heute fast jedes zweite produzierte Gut für den Export bestimmt (Fraunhofer ISI, 2009). Generell stellt die industrielle Wasserentnahme ein Maß für das durchschnittliche Einkommen der Bewohner der betrachteten Region dar und reicht von 5 % der Gesamtentnahme in Niedriglohnländern bis hin zu 40 % in einkommensstarken Gebieten (WWAP, 2012). Analog zum Wasser-Energie-Nexus steht somit die wirtschaftliche Entwicklung einer Region in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung des regionalen Energiebedarfs bzw. der -versorgung (Deutsche Bank *Research*, 2011).

Eine der größten Herausforderungen in Schwellen- und Entwicklungsländern stellt daher der bedarfsgerechte und nachhaltige Ausbau der Wasser- und Energieinfrastruktur dar, ohne die daraus resultierenden Umweltbelastungen aus den Augen zu verlieren (siehe Abbildung 2.4). Hingegen wird in Industriestaaten mit höherem ökonomischem Potential weiterhin die Effizienzsteigerung in Industrie und Energiewirtschaft sowie die infrastrukturelle Optimierung im Fokus stehen. Die erforderlichen Maßnahmen können jedoch aufgrund defizitärer Haushaltsbudgets in vielen Ländern nicht alleine von der öffentlichen Hand getragen werden. Aufgrund zu geringer bzw. subventionierter Wasserpreise wird in vielen Regionen nicht kostendeckend gewirtschaftet, wobei Preissteigerungen jedoch insbesondere die wirtschaftlich schlechtgestellten Bevölkerungsschichten treffen würden. Daher ist künftig damit zu rechnen, dass private Unternehmen verstärkt an infrastrukturellen bzw. wasserbaulichen Projekten beteiligt werden, bspw. in Verbindung mit einer nachgeschalteten Gewinnbeteiligung. Entsprechende Maßnahmen können sowohl auf freiwilliger Basis (z.B. Öffentlich-private Partnerschaft, englisch: *Public Private Partnerships*, PPP) und in Kooperation mit öffentlichen Einrichtungen umgesetzt als auch durch „Ordnungsrecht induziert werden“. (Deutsche Bank *Research*, 2011)



Abbildung 2.4: Beispiele für industrielle Abwasserströme in Schwellen- und Entwicklungsländern⁵ (links) sowie für die Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in Industrienationen⁶ (rechts)

Um dem steigenden Konsumbedarf bzw. der steigenden Produktionsmasse entgegenzuwirken, muss der spezifische Verbrauch in der Produktion gesenkt sowie der Einsatz umweltverträglicher

⁵ <http://organicbiotechindia.blogspot.de/2014/06/waste-water-treatment-plant-managers-is> (17.12.2015)

⁶ http://www.siemens.com/press/de/events/media_summit_2007/index.php (17.12.2015)

Produktionsmittel zur Reduzierung von schädlichen Abwässern gesteigert werden (WWAP, 2012). Vor dem Hintergrund, dass noch heute 90 bis 95 % der weltweiten Abwasserströme aus Industrie und privaten Haushalten ungeklärt rückgeführt werden, wodurch lokale bzw. regionale Wasserressourcen „in einem erheblichem Maße unbrauchbar gemacht“ werden (Alwardt, 2011), sind diese Vorhaben von entscheidender Bedeutung. Bei einer globalen jährlichen Abwassermenge von ca. 1.500 km³ muss mit einer Abwasserbelastung von bis zu 12.000 km³ gerechnet werden unter der Annahme, dass ein Liter Abwasser bis zu acht Liter Süßwasser verunreinigen kann.

Um entsprechende Maßnahmen umsetzen und somit das Wirtschaftswachstum auf einem für Bevölkerung, Umwelt und Ökonomie verträglichen Niveau halten zu können, müssen seitens des Gesetzgebers geeignete Regularien beschlossen und umgesetzt werden. Dies schließt neben umfassenden Umweltschutzrichtlinien auch Emissionsgrenzwerte sowie Belastungsgrenzen für Abwasserströme des produzierenden Gewerbes ein. Beispielsweise kommen in industriellen Abfällen bzw. Abwässern häufig Kontaminanten in konzentrierterer und widerstandsfähigerer Form vor als in anderen Sektoren, wodurch langanhaltende Belastungen für die Umwelt im Allgemeinen und den Wasserkreislauf im Speziellen entstehen können. (WWAP, 2012)

Aufgrund des hohen Verbrauchsanteils von Landwirtschaft und Industrie gibt es vielerorts Bestrebungen, die Wasserpreispolitik durch Reduzierung bzw. Abschaffung von Subventionen auf die aktuellen Gegebenheiten abzustimmen. Ein Ansatz ist eine gestaffelte Preisgestaltung mit höheren Abgaben industrieller Nutzer im Vergleich zu privaten Haushalten sowie eine mengenabhängige Steigerung des Wasserpreises. Somit soll das Streben nach effizienten Prozessen sowie ein schonender Umgang mit den verfügbaren Ressourcen unterstützt werden. Dieser Ansatz birgt jedoch auch erhebliche Risiken. Unternehmen können zum einen ihre Mehrkosten durch Preissteigerungen auf die Kunden abwälzen, oder, besonders im Falle multinationaler Unternehmen, kann es auch zur Schließung und Verlagerung von Produktionsstätten hin zu wirtschaftlich attraktiveren Standorten kommen. (WWAP, 2012)

Es muss demnach ein Kompromiss gefunden werden, der einerseits die Industrie in ihrem Wachstum unterstützt und somit eine positive konjunkturelle Entwicklung ermöglicht. Andererseits müssen deutliche Grenzen hinsichtlich eines nachhaltigen Umweltschutzes gesetzt und deren Einhaltung überwacht werden. Hierzu ist die Etablierung einer verantwortlichen Behörde oder Institution unabdingbar, welche auf nationaler Ebene eine klare Sektorpolitik vertritt und die Einhaltung geeigneter Gesetze und Richtlinien überwacht. Zusätzlich sind auch kompetente Fachbehörden erforderlich, die sowohl Projekte der öffentlichen Hand als auch PPP-Projekte und private Vorhaben unterstützen. (BMZ, 2006)

Ökosysteme

Wenngleich es keine einheitliche Definition eines Ökosystems gibt, so gilt es doch als komplexes Wirkungsgefüge verschiedener Organismen innerhalb eines bestimmten Lebensraums. Laut WWAP (2012) bietet ein intaktes Ökosystem aufgrund seiner Vielschichtigkeit den darin lebenden Menschen einen vielfältigen Nutzen; Störungen seiner Wirkungsweise können hingegen weitreichende Folgen haben. Beispielsweise steht das Vorhandensein von Frischwasser in direktem Zusammenhang mit der dauerhaften Funktionsfähigkeit eines Ökosystems. Neben der Frischwasserversorgung zeichnet sich ein Ökosystem durch weitere „Leistungen“ oder auch *Ecosystem Services* (ES) aus wie z.B. Klimaregulierung, Bereitstellung fruchtbarer Böden, Kohlenstoffspeicherung im Boden sowie Nährstoffrecycling.

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Wasser ist die Basis aquatischer Ökosystemleistungen. Darüber hinaus gibt es auch einen Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein von Wasserressourcen und terrestrischen Ökosystemleistungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Ökosysteme durch ihre vielfältigen Funktionen kein Wasser verbrauchen, sondern es aufbereiten. Nicht zuletzt durch das Wasser sind Ökosystemleistungen untereinander vernetzt, wodurch die Beeinflussung einer Funktion i.d.R. weitere ES beeinflusst. Ein nachhaltiges Wassermanagement ist demnach nur möglich, wenn die Funktionsweise des Ökosystems ganzheitlich erfasst wird. Bislang gibt es noch keine einheitliche Methode zur Analyse und Bewertung von Ökosystemleistungen. Jedoch konnten in den vergangenen Jahrzehnten Ansätze entwickelt werden, mit deren Hilfe eine Priorisierung erforderlicher Maßnahmen für den Erhalt von Ökosystemen ermöglicht wurde. Aus den hierdurch erzielten Ergebnissen geht hervor, dass ein Großteil der wasserinfrastrukturbezogenen Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten für die Kompensation entfallener oder nicht (mehr) ausreichender Ökosystemleistungen aufgewandt wird. Ein anschauliches Beispiel ist die Wasserqualität, welche durch teils aufwändige Reinigungstechniken künstlich erzeugt werden muss, da aufgrund anthropogener Einflüsse die natürlichen Kapazitäten nicht (mehr) ausreichen.

Ein gesundes Ökosystem kann also vielfältige Funktionen erfüllen, die andernfalls durch den Menschen übernommen werden müssen. Somit kann den einzelnen Ökosystemleistungen ein sozio-ökonomischer Gegenwert zugewiesen werden. Um jedoch die Funktionsfähigkeit des Ökosystems erhalten zu können, muss dem Entnahmegewässer eine Mindestwassermenge (Restwassermenge) erhalten bleiben. Basierend auf diesem Ansatz können sogenannte „Entscheidungsunterstützungssysteme“ (englisch: *Decision Support Systems*, DSS) entwickelt werden. Neben Oberflächengewässern können bspw. auch Grundwasservorkommen und Bodenfeuchte sowie Vorgänge wie Evapotranspiration Berücksichtigung finden. DSS sind wichtige Werkzeuge für ganzheitliche Ansätze zur Verbesserung von Strukturen und Abläufen im Wassersektor wie das „Integrierte Wasserressourcen-Management“ (IWRM, siehe Kapitel 2.6.1).

Bevor der IWRM-Ansatz internationale Akzeptanz erlangte, war die Wasserentnahme i.d.R. bedarfsorientiert gesteuert, wodurch nicht selten eine Übernutzung der Ressourcen sowie mitunter auch Umweltzerstörung und Konflikte die Folge waren. Auch mit dem IWRM-Ansatz gibt es Diskussionen über die Ressourcenverteilung unter den einzelnen Sektoren sowie dem Ökosystem selbst, jedoch sind diese Kontroversen mit einem Bewusstsein für die Bedeutung dieser Thematik verknüpft. Da jedoch nach wie vor die Wasserverfügbarkeit und der Wasserbedarf in vielen Regionen in einem wenig sinnvollen Verhältnis stehen, sind die Anforderungen zur Umsetzung eines IWRM in hohem Maße standortabhängig. Doch welche Faktoren bestimmen die räumlich und zeitlich zu differenzierenden Mengen bzw. den Bedarf? In den nachfolgenden Kapiteln werden die maßgeblichen Einflussgrößen benannt und umrissen.

2.3 Naturräumliche Einflüsse

2.3.1 Hydrogeologische Standortbedingungen

Der Wasserkreislauf kann global als auch lokal betrachtet als hochkomplexes Zusammenspiel einer Vielzahl dynamischer Prozesse beschrieben werden. Die Verfügbarkeit von Wasser hängt zunächst von den zu erwartenden Niederschlagsmengen ab, da sie als wesentlicher Teil des interaktiven Klimasystems die einzige Quelle zur Auffüllung von Wasserspeichern sind (IPCC, 2007). Diese können sich sowohl nach Region (arid, semi-arid, feucht) als auch nach Jahreszeit (Regen-, Trockenzeit) erheblich unterscheiden (siehe Abbildung 2.5).



Abbildung 2.5: Ausgetrocknetes Flussbett⁷ in China (links), feuchte Landschaft in Thüringen (rechts)⁸

Daher ist die Thematik des Klimawandels auch im Hinblick auf etwaige Änderungen der räumlichen und zeitlichen Verteilung bzw. Umverteilung von Wasserressourcen von entscheidender Bedeutung. Generell treten Niederschläge sehr unregelmäßig auf und hängen stark von der Temperatur und der Witterung ab. Niederschlagsparameter wie Menge, Intensität, Art und Häufigkeit sind generell großen natürlichen Schwankungen unterworfen und werden durch atmosphärische und ozeanische Zirkulation sowie durch verschiedene Klimaphänomene weiter beeinflusst. Ergeben sich lokale, (über-) regionale oder gar globale Änderungen des Klimas, so folgt unweigerlich eine Beeinflussung der Niederschlagscharakteristik in den betroffenen Regionen. Zeitliche Maßstäbe für diese Mechanismen aufgrund sogenannter äußerer Antriebe reichen von mehreren Monaten bis hin zu Millionen von Jahren; aus wissenschaftlicher Sicht liegt der übliche Betrachtungszeitraum bei ca. 30 Jahren. (IPCC, 2007)

Weitere natürliche Einflussgrößen bzgl. der Charakteristik des Wasserkreislaufs sind die Topografie, Geologie oder Vegetation einer Region. Auch anthropogene Eingriffe können die Funktionsweise des Wasserkreislaufs nachhaltig verändern. Beispielsweise führt großflächige Bebauung zur Bodenversiegelung, die Änderungen von Gewässerstrukturen zieht u.a. den Verlust natürlicher Rückhaltevermögen nach sich, (Bewässerungs-) Landwirtschaft sowie die Abholzung von Waldflächen kann zu Veränderungen der Bodenzusammensetzung, zu Bodenversalzung sowie zu erhöhter Bodenerosion führen.

2.3.2 Erderwärmung und (verstärkte) Klimaphänomene

Die Erderwärmung als Folge von menschlichen Eingriffen in die Natur beeinflusst den Wasserhaushalt nachhaltig. Untersuchungen zufolge ist der anthropogen verstärkte Treibhauseffekt ursächlich für die weltweit steigenden Durchschnittstemperaturen, welche künftig zunehmend zu einer beschleunigten Austrocknung der Landoberfläche sowie zu einer erhöhten Verdunstungsrate oberflächiger Wasserspeicher führen können. Durch die Verknappung der Wasserressourcen kann es somit zu einer weiteren Verschlechterung der Wasserversorgung in Regionen kommen, die bereits heute unter teils extremer Wasserknappheit leiden. Weitere potentielle Konsequenzen der Erderwärmung sind die Verlängerung bzw. Intensivierung von Dürreperioden sowie die Umverteilung der Niederschlagsereignisse auf wenige Ereignisse mit teils katastrophalen Folgen durch Überschwemmungen. (IPCC, 2007)

⁷ <http://cdn4.spiegel.de/images/image-207543-galleryV9-yvpm-207543.jpg> (11.05.2016)

⁸ http://www.thueringen.de/th8/tmuen/naturschutz/biologische_vielfalt/vielfalt_von_lebensraeumen_landschaften/index.aspx#8 (11.05.2016)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Im Hinblick auf die Entwicklung der Durchschnittstemperaturen werden regionale Unterschiede erwartet. Die Vorhersage in Bezug auf künftige Niederschläge gestaltet sich aufgrund der höheren Komplexität des Wasserhaushalts hingegen ungleich schwerer. Tendenziell wurde in den vergangenen Jahren in Polnähe eine Zunahme, in vielen tropischen Regionen eine Abnahme der Niederschläge beobachtet (IPCC, 2007). Zusätzlich zur Rückläufigkeit der Niederschlagsmengen wurde in den Tropen (insbesondere für Regionen im tropischen Pazifikraum) eine Verschiebung hin zur Regenzeit und somit eine zusätzliche Verstärkung und/oder Verlängerung der Trockenzeit beobachtet (IPCC, 2007). Auch die geografische Lage in Bezug zu Ozeanen und Gebirgen spielt bei der Betrachtung etwaiger Klimaveränderungen eine Rolle. Klimatheorien besagen, dass sich das Innere der Kontinente stärker erwärmen wird als Küstenregionen, wodurch die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung unterschiedlich stark beeinflusst wird (IPCC, 2007). Regionale Klimaphänomene, welche unter bestimmten klimatischen Voraussetzungen auftreten, stellen weitere Einflussfaktoren für den Wasserkreislauf dar. Drei der einflussreichsten Phänomene sind die *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), die *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) sowie die *North Atlantic Oscillation* (NAO) (WWAP, 2012).

Das wohl bekannteste Phänomen, die *El Niño-Southern Oscillation*, ist wesentlicher Treiber des saisonalen und langzeitlichen Weltklimas. Dabei herrscht im tropischen Pazifik aufgrund von Nordost- und Südostpassaten eine west-gerichtete Meeresströmung. Vor der Küste Südamerikas wird das nach Westen verschobene Oberflächenwasser durch kaltes Auftriebswasser ersetzt, welches ebenfalls nach Westen nachströmt und sich dabei erwärmt. Im tropischen westpazifischen Raum bzw. in Südostasien und Nordaustralien führen die erwärmten Wassermassen zu labilen Luftschichtungen und einem Tiefdruckgebiet an der Oberfläche, gefolgt von hohen Niederschlagsmengen. Gleichzeitig strömen die aufsteigenden warmen Luftmassen nach Osten und sinken vor der südamerikanischen Küste über dem Ostpazifik ab. Das Zusammenwirken der absinkenden Luftmassen mit dem kalten Auftriebswasser führt in Bodennähe zu einem Hochdruckgebiet, das mit erheblicher Trockenheit einhergeht. Diese ozeanischen und atmosphärischen Zirkulationsphänomene werden in ihrer Gesamtheit als *Walker-Zirkulation* bezeichnet. Bei ENSO-Ereignissen führen atmosphärische Anomalien zu einer Umkehrung der *Walker-Zirkulation*. Dabei führt eine Abschwächung der Passatwinde zu einer Strömung des warmen Oberflächenwassers aus dem westpazifischen Raum hin zur Westküste Südamerikas sowie zu einer Unterbrechung des Auftriebs kalten Tiefenwassers. Weiterhin bedingt das warme Oberflächenwasser eine Erwärmung der Luftmassen, wodurch es zu Konvektionsströmen sowie zu starken Niederschlägen im ostpazifischen Raum kommt. Gleichzeitig treten im tropischen westpazifischen Raum sowie in Nordaustralien außergewöhnliche Trockenphasen auf. (WWAP, 2012)

Die mit den ENSO-Ereignissen verbundenen Konvektionsströme haben auch Auswirkungen auf weitere Regionen dieser Erde. Neben Südostasien, Nordaustralien und Südamerika betrifft dies insbesondere auch Teile Afrikas und Nordamerikas. Weiterhin beeinflusst das ENSO-Phänomen insbesondere in den Tropen die Niederschläge, die Temperatur, die Entstehung von (tropischen) Stürmen, das Ökosystem, die Landwirtschaft sowie die Verfügbarkeit von Wasserressourcen. Eine Störung dieses Mechanismus', beispielsweise durch eine Erhöhung der regionalen Durchschnittstemperaturen, hätte weitreichende Folgen auf die Niederschlagsverteilung und somit auf das Leben der Bewohner der betroffenen Regionen. (WWAP, 2012)

2.3.3 Karst und Wasser

Die Geologie einer Region, also die Beschaffenheit des Untergrunds stellt einen weiteren Einflussfaktor in Bezug auf die Verteilung und Verfügbarkeit von Wasserressourcen dar. Die Charakteristik des Untergrunds ist insbesondere dann von großer Bedeutung, wenn es wie in Karstregionen aufgrund erhöhter Durchlässigkeit zu hohen Infiltrationsraten des Niederschlags und somit zu einem Mangel an Oberflächengewässern kommt. Hierdurch ist die Erschließung der unterirdischen bzw. schwer zugänglichen Karstwasserressourcen mit hohem technischem und finanziellem Aufwand verbunden. Mehr als 25 % der Weltbevölkerung lebt in Karstgebieten bzw. sind auf die Trinkwasserversorgung durch Karstgrundwasserleiter angewiesen (siehe Abbildung 2.6) (Williams und Ford, 2006). Literaturangaben zufolge nehmen diese Gebiete zwischen 10 und 15 % der eisfreien kontinentalen Fläche ein (Pfeffer, 2010). Hierdurch wird die Relevanz eines angepassten Wasserressourcenmanagements in diesen von Karbonatgestein dominierten Regionen ersichtlich. Aufgrund ihrer geökologischen Eigenschaften sind Karstregionen nahezu unabhängig von den klimatischen Bedingungen durch teils erheblichen Wassermangel geprägt. Dies kann durch drei wesentliche gemeinsame Geofaktoren erklärt werden, welche die Hauptcharakteristika von Karstlandschaften beschreiben.

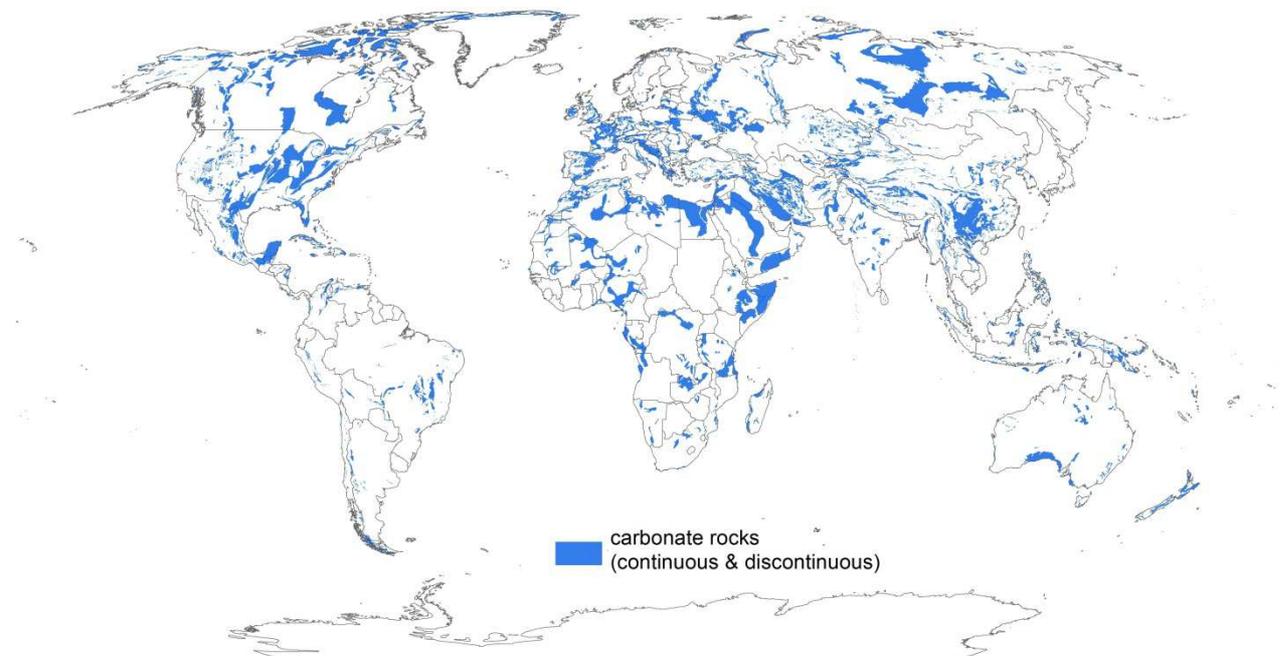


Abbildung 2.6: Weltweite Verteilung von Karbonatgestein⁹

Erstens besteht der Karstuntergrund aus leicht wasserlöslichem Gestein, wodurch „an der Landoberfläche Lösungsformen (Korrosionsformen) und im Untergrund erweiterte Kluftsysteme und Höhlen entstehen“ (Pfeffer, 2010). Zweitens kommt es an vielen Stellen der Landoberfläche durch hohe Infiltrationsraten des verkarsteten Untergrunds zum direkten Versickern der Niederschläge und somit zu fehlenden Speichermöglichkeiten an der Oberfläche. Die Folge ist eine unterirdische Entwässerung – keine oberflächige wie in humiden Regionen üblich. Im Inneren des Karstaquifers sammelt sich das versickerte Wasser in unterirdischen Hauptabflussbahnen und tritt am Rand der Karstgebiete aus unterschiedlichen, teils stark

⁹ Kartographie von Chen und Goldscheider, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie, erstellt im Rahmen des WOKAM-Projektes (*World Karst Aquifer Mapping Project*)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

schüttenden Quellen aus. Bei ans Meer angrenzenden Karstregionen kann der Austritt auch in submarinen Quellen erfolgen (Pfeffer, 2010). Der dritte Aspekt betrifft die hohe Wasserlöslichkeit des Untergrunds. Diese führt zur Ausbildung korrosionsbedingter spezifischer Oberflächenformen wie bspw. dem Kegel- oder Turmkarst, deren „*Verbreitung auf die mit diesen petrographischen und hydrographischen Grundlagen ausgestatteten Regionen beschränkt*“ ist (Pfeffer, 2010).

In humiden Regionen werden bis zu 50 % der Niederschlagsmengen dem Karstuntergrund zugeführt. Im Zusammenhang mit den im Allgemeinen großflächigen Einzugsgebieten ergeben sich somit i.d.R. hohe Schüttungsraten der Karstquellen. Selbst in Regionen, die einer jährlich wiederkehrenden Trockenzeit unterworfen sind, kann für gewöhnlich eine ganzjährige Schüttung beobachtet werden. Der Grund ist die Rückhaltungwirkung des Karstaquifers durch temporäres Auffüllen in Perioden mit hohen Niederschlägen sowie sukzessive Entwässerung über die anschließende niederschlagsarme Zeit. Dies hat zur Folge, dass der Karstfluss trotz zeitweise geringer Niederschläge ganzjährig wasserführend ist. Im Falle der Zugänglichkeit kommt einer Karstquelle somit ein großes Nutzungspotential zu und es kann eine ökonomisch sinnvolle Wasserentnahme realisiert werden. Nachteilig ist jedoch die schnelle Reaktion der Karstquellen auf Niederschlagsereignisse, wodurch eine stark ausgeprägte Variabilität der Schüttungsraten resultiert. Im Hinblick auf eine kontinuierliche Wasserversorgung ist diese Eigenschaft als kritisch zu bewerten, da im Falle ausbleibender Niederschläge ein ebenso geringes Wasserdargebot in der anschließenden Trockenperiode unvermeidlich ist. Darüber hinaus führen unterschiedliche Schüttungsraten auch zu Unterschieden in der Wasserqualität – dies betrifft u.a. die Trübung, den pH-Wert, den Kalkgehalt sowie die Variation der Schadstoffkonzentrationen. (Pfeffer, 2010)

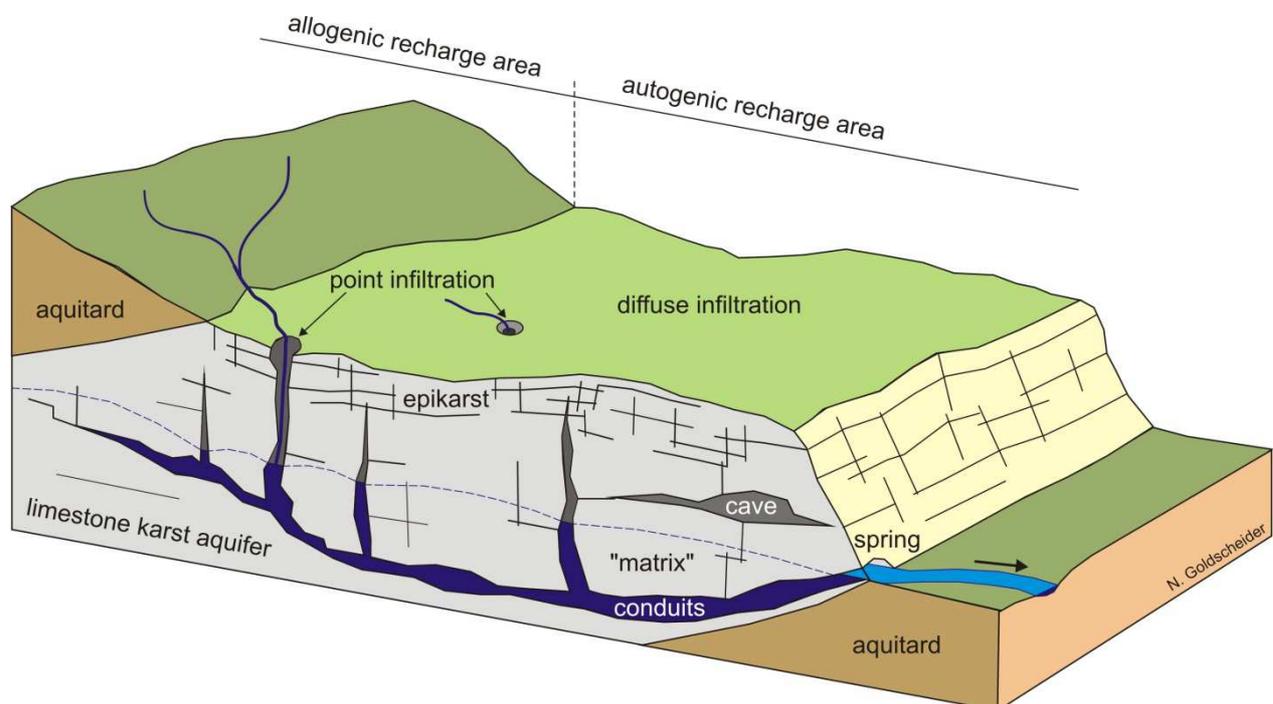


Abbildung 2.7: Blockbild einer Karstlandschaft zur Veranschaulichung unterirdischen Wasserressourcen sowie des unterirdischen Wasserkraftpotentials, verändert nach Goldscheider und Drew (2007)

Sind Karstquellen schlecht zugänglich oder gar submarin, so können die Wasserressourcen nur vor dem Austritt mit erheblichem zeitlichem, technischem und finanziellem Aufwand erschlossen werden. Aufgrund der komplexen Lösungsvorgänge innerhalb des Karstaquifers und der daraus resultierenden inhomogenen Verteilung der Wasserressourcen ist alleine die

anfängliche Exploration sehr aufwändig. Auch durch die tiefe Lage der unterirdischen Karstwasservorkommen, die in Extremfällen mehrere hundert Meter betragen kann, sowie durch die inhomogene Verteilung werden die Erkundung und Nutzbarmachung weiter erheblich erschwert. Nicht zuletzt führt die hohe Durchlässigkeit zu vergleichsweise geringen Verweilzeiten des Wassers im Gestein, was eine geringe Filterwirkung des Karstgesteins sowie eine erhöhte Anfälligkeit der Karstwasserressourcen für Kontamination durch anthropogenen Schadstoffeintrag zur Folge hat. Bei der Nutzung von Karstwasser sind daher eine kontinuierliche Überprüfung der Wasserqualität sowie eine technisch und finanziell aufwändige Aufbereitung unerlässlich. (Dittmann et al., 2011)

Dies gilt gleichermaßen für die Nutzung von Wasser aus Karstwannenseen, die heute noch (Stand August 2015) in vielen entlegenen Regionen in Schwellen- und Entwicklungsländern praktiziert wird (Dittmann et al., 2011). Diese stehenden Gewässer haben jedoch den Nachteil, dass die Wasserqualität durch die Sonneneinstrahlung erheblich beeinflusst wird. Weiterhin gehen die Reserven dieser Gewässer aufgrund von Verdunstung, Versickerung sowie aufgrund einer intensiven anthropogenen Nutzung vergleichsweise schnell zur Neige, weshalb sie i.d.R. nur als temporäre Lösung betrachtet werden können. Neben der o.g. ökologischen Belastung führt das Bevölkerungswachstum und die damit einhergehende Besiedelung auch in Karstgebieten zu einer zunehmenden Versiegelung des Bodens, wodurch immer weniger Niederschlagswasser im Karstaquifer ankommt (Pfeffer, 2010).

2.4 Einflüsse von Bevölkerung und Gesellschaft

2.4.1 Migration und Urbanisierung

Insbesondere in urbanen Gebieten wird in den kommenden Jahren eine deutliche Steigerung der Bevölkerungszahl erwartet. Aus heutiger Sicht beläuft sich bis ins Jahr 2050 die Zahl hinzugekommener städtischer Bewohner auf ca. 2,9 Milliarden Menschen. Somit wird im Grunde nicht nur das bis zu diesem Zeitpunkt prognostizierte weltweite Bevölkerungswachstum von ca. 2 Milliarden Menschen durch urbane Ballungsgebiete absorbiert, sondern es wird auch eine Migration aus ländlichen hin zu städtischen Regionen erwartet. Jedoch sind nicht alle Regionen der Erde gleichermaßen von dieser Tendenz betroffen. Aus der heutigen Entwicklung lässt sich ableiten, dass insbesondere Schwellen- und Entwicklungsländer mit dem Phänomen des urbanen Bevölkerungswachstums zu kämpfen haben werden. Dabei wird alleine in Asien bis 2050 ein urbanes Bevölkerungswachstum von 1,7 Milliarden Menschen erwartet, weitere 800 Millionen Menschen werden zusätzlich in (Groß-) Städten Afrikas leben. Aufgrund dieser Entwicklung wird bereits im Jahr 2030 die städtische Bevölkerungszahl in Schwellen- und Entwicklungsländern um das Vierfache höher liegen als in Industrienationen. (WWAP, 2012)

Durch die Entstehung regionaler Ballungszentren, so genannter *Mega Cities*, ergeben sich enorme Herausforderungen für Stadtplaner und -entwickler insbesondere im Hinblick auf die Energie- und Trinkwasserversorgung bzw. die Abwasserentsorgung (siehe Abbildung 2.8). Bereits heute sind in Entwicklungsländern Schätzungen zufolge lediglich 30 % der städtischen Haushalte an die Wasserinfrastruktur angeschlossen, wobei dieser Wert noch keine Aussage über die Versorgungssicherheit oder Wasserqualität ermöglicht. Eine Erhöhung dieses Anteils ist vor dem Hintergrund steigender Bevölkerungszahlen daher nur zu erwarten, wenn erhebliche Anstrengungen zum Ausbau der Wasserinfrastruktur über das heutige Engagement hinaus unternommen werden, sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Natur. (Alwardt, 2011)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Durch das schnelle Städtewachstum im Zusammenhang mit unzähligen Strukturmaßnahmen, Währungsabwertungen sowie staatlichen Sparmaßnahmen ist in Ballungsgebieten die massenhafte Entstehung von Armen- bzw. Elendsvierteln, so genannten *Slums*, unvermeidbar (Davis, 2007). Diese i.d.R. inoffiziell bzw. illegal angelegten Siedlungen sind charakterisiert durch eine enorme Bevölkerungsdichte und Armut sowie fehlenden oder unangemessenen Zugang zu Trinkwasser oder sanitären Einrichtungen. Häufig werden diese Armen- bzw. Elendsviertel in für menschliche Siedlungen ungeeigneten Gebieten mit hoch vulnerablem Untergrund errichtet, wodurch die dortigen (Grund-) Wasservorkommen einer erheblichen Gefahr an Kontamination ausgesetzt sind (WWAP, 2012). Bereits heute gibt es *Mega Cities*, in denen mehr als die Hälfte der Einwohner in *Slums* leben (WWAP, 2012). Beispielsweise leben in Äthiopien und im Tschad je 99,4 % der städtischen Bevölkerung in derlei Armenvierteln (Davis, 2007). Laut Schätzungen der Vereinten Nationen waren im Jahr 2001 mindestens 921 Millionen Menschen Bewohner von *Slums*, 2005 waren es bereits mehr als eine Milliarde Menschen (Davis, 2007).



Abbildung 2.8: Beispiele für *Mega Cities* (Tokio, Japan¹⁰, links) und *Slums* (Mumbai, Indien¹¹, rechts)

Diese Entwicklung gipfelt in einem Teufelskreis, da steigende Bevölkerungszahlen und rasche Urbanisierung zu einem immer größer werdenden punktuellen Wasserbedarf führen, wodurch die Regenerationsfähigkeit des betroffenen Ökosystems herabgesetzt wird und somit immer weniger Ressourcen zur Verfügung stehen. Darüber hinaus wird bei der Abschätzung des erforderlichen Wasserbedarfs für eine Armensiedlung häufig auch die Zahl der *Slum*-Bewohner aufgrund ungenügender Datengrundlagen unterschätzt. (WWAP, 2012)

Offiziellen Untersuchungen zufolge lag im Jahr 2010 die Zahl der Menschen ohne gesicherten Trinkwasserzugang bei 130 Millionen in städtischen und bei 653 Millionen in ruralen Regionen (UNICEF und WHO, 2012). Aufgrund der weltweit wachsenden Anzahl an *Slums* sowie der zunehmenden Einwohnerzahl dieser Gebiete ist in Realität vermutlich ein deutlich höherer Wert anzunehmen. Generell erfolgt die Wasserversorgung für urbane Ballungszentren häufig durch eine exzessive Nutzung der Grundwasservorkommen, durch oberstromige Wasserentnahmen oder durch Erschließung von Ressourcen in ländlichen Gebieten. Letzteres kann zu einer Einschränkung der ländlichen Bevölkerung sowie einer Beeinflussung des dortigen Ökosystems führen. Wie auch bei der Rückführung von in Ballungsgebieten häufig unzureichend behandelten Abwässern wird das Problem somit verlagert statt gelöst. (WWAP, 2012)

¹⁰ <http://wirtschaftsblatt.at/home/life/timeout/reise/1321268/Tokio-jetzt> (17.12.2015)

¹¹ http://thealternative.in/wp-content/uploads/2011/12/Slum_nofacilities_MeenaKadri.jpg (17.12.2015)

2.4.2 *Brain-Drain-Effekt*

Migration und Urbanisierung führen häufig nicht nur zu den oben beschriebenen Problemen in Ballungsgebieten sondern auch zu vorwiegend negativen Auswirkungen auf ländliche Regionen. Letzteren wird durch die Abwanderung von (fachlich ausgebildeten) Arbeitskräften Humankapital (Arbeitskraft, Kenntnisse und Fähigkeiten, Innovationspotential usw.) entzogen, was insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern zur erheblichen Beeinträchtigung der Entwicklung betroffener Gebiete führt. Ursachen für diesen *Brain Drain Effect* sind exogene Faktoren wie bessere Arbeitsbedingungen oder höhere Löhne in der Zielregion sowie endogene Faktoren wie bspw. politische Instabilität in der Ursprungsregion. (Heuer, 2011)

Darüber hinaus kommt es in Herkunftsregionen von Migranten nicht selten zu Überschüssen an hochqualifizierten Arbeitskräften aufgrund schlechter Perspektiven in der Industrie (sofern es ansässige Industrien gibt) sowie in der Wissenschaft, wodurch es zur Überschreitung der Aufnahmekapazitäten des Arbeitsmarktes und somit zum *Brain Overflow* kommen kann. Dieses Missverhältnis von Arbeitskraftqualifikation und den Anforderungen offener Stellen – sofern überhaupt vorhanden – führt häufig zum Wunsch, sich durch Migration wirtschaftlich und gesellschaftlich besserstellen zu können. (OECD, 2008)

Einige Forscher vertreten jedoch auch die Meinung, dass in diesem Fall die Abwanderung von Fachkräften durchaus positive Auswirkungen auf die Entwicklung in ihrer Heimat haben kann. Dabei fördert die Aussicht auf eine Besserstellung, wenngleich in einer anderen Region oder einem anderen Land, die Motivation sich weitere Qualifikationen anzueignen. Somit können die Fachkräfte zu einer Verbesserung der Situation beitragen, solange sie noch in ihrer Heimat tätig sind, wodurch auf lange Sicht hin ein positiver Trend erzeugt werden kann. Überwiegt dieser Zugewinn positiver Effekte, der so genannte *Brain Gain*, die negativen Auswirkungen, so wird von einem *Beneficial Brain Drain* gesprochen. In Studien konnte jedoch bereits exemplarisch nachgewiesen werden, dass dieser Effekt branchen- und regionsabhängig ist und somit nur unter bestimmten Voraussetzungen zum Tragen kommt. (Heuer, 2011)

Leidet eine Region unter Wasserknappheit oder Wassermangel, so kann die Abwanderung von Fachkräften des Wassersektors zu einer Verschlechterung der Infrastruktur und somit auch zu einer erheblichen Verschlechterung der Gesamtsituation führen. Dieser Prozess ist insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern zu beobachten. Häufige Probleme bei der Umsetzung von infrastruktureller Maßnahmen im Wassersektor betroffener Regionen sind die Verwendung ungeeigneter Baustoffe, mangelhafte Konzeption, ungeeignete Konstruktionsmethoden, ungenügende Wartungsmaßnahmen, unvollständige Dokumentation sowie der unsachgemäße Betrieb technischer Anlagen. Dabei führt eine anhaltend defizitäre Wasserversorgung zur Stagnation hinsichtlich der Entwicklung der betroffenen Volkswirtschaft. Eine Verschlechterung der Versorgungssituation hat zudem erhebliche negative Auswirkungen auf verbrauchsintensive Industriezweige sowie auf die Landwirtschaft, wodurch es zu einer (beschleunigten) Kettenreaktion mit dramatischen volkswirtschaftlichen Konsequenzen kommen kann. Gerade in ländlichen, stark landwirtschaftlich geprägten Regionen ist somit die Sicherstellung einer nachhaltigen Wasserversorgung die Grundvoraussetzung für eine Verringerung des *Brain-Drain*-Effekts sowie für einen sozio-ökonomischen Aufschwung. (WWAP, 2012)

2.4.3 **Soziologische und technologische Einflüsse**

Ein Unternehmen, das in den Bereichen Wasserversorgung oder Abwasserentsorgung tätig ist, sollte i.A. *„nicht nur seine Kosten kennen, es muss diese auch durch angemessene*

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Tarifeinnahmen decken können“ (KfW, 2008). Die Implementierung einer wirtschaftlich tragfähigen Wasserversorgung ist jedoch in Regionen mit schwer zugänglichen und/oder begrenzten Wasserressourcen eine schwer zu erfüllende Aufgabe. In vielen hochentwickelten Ländern wird die Wasserversorgung daher bereits seit vielen Jahren durch gesetzliche Richtlinien und Subventionsprogramme geregelt und gesichert. *„In der Realität der Entwicklungsländer“* ist dies *„aufgrund eines hohen Zentralisierungsgrades oder einer starken politischen Einflussnahme oft nicht der Fall“* (KfW, 2008). Die *Millennium Development Goals* (MDG) der Vereinten Nationen zielen daher auf die Verbesserung der Wasser- und Hygieneversorgung für Menschen ab, die aufgrund ihres geringen Einkommens unterhalb der Armutsgrenze leben und die Kosten zur Umsetzung der MDG nicht selbst tragen können. In diesem Zusammenhang muss die Finanzierung erforderlicher Maßnahmen daher meist durch die öffentliche Hand gewährleistet werden (Dittmann et al., 2011).

Im Hinblick auf die nachhaltige Entwicklung einer Region ist aus sozio-ökonomischer Sicht der nicht-monetäre bzw. indirekte Nutzen einer verbesserten Wasserversorgung – bspw. durch den wirtschaftlichen Aufschwung der Region – von großer Bedeutung (siehe Kapitel 2.2). Viele Schwellen- und Entwicklungsländer sind, ungeachtet ihrer Wasserversorgungssituation, Nahrungs-, Genussmittel- bzw. Konsumgüterlieferanten (Kaffee, Soja, Kakao, Baumwolle usw.) für Menschen wohlhabenderer Nationen. Die Realisierung einer nachhaltigen Wasserversorgung kann somit neben der Versorgung der lokalen Bevölkerung im täglichen Leben auch einen enormen wirtschaftlichen Schub bewirken, indem beispielsweise die Agrarindustrie sowie das produzierende Gewerbe unterstützt bzw. (ausreichend) versorgt werden. (WWF, 2009)

Entscheidend für die nachhaltige Sicherung der Wasserversorgung sind weiterhin die sozio-kulturellen Randbedingungen der Zielregion, da sie ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf die lokale Bedarfssituation haben. Beispielsweise ist ca. die Hälfte der Weltbevölkerung darauf angewiesen, die eigene Ernährung bzw. Einkommensquelle durch den verbrauchsintensiven Reisanbau zu sichern (siehe Kapitel 2.2). Reis stellt in den betroffenen Regionen bzw. Staaten (vornehmlich im asiatischen und afrikanischen Raum) ein traditionelles und unverzichtbares Grundnahrungsmittel dar, weshalb die Menschen bereit sind, bis zum Fünffachen der Wassermenge für dessen Anbau zu nutzen im Vergleich zu den ebenfalls verbrauchsintensiven Agrarprodukten Mais oder Weizen. Vor dem Hintergrund des prognostizierten Bevölkerungswachstums insbesondere im asiatischen Raum ergeben sich hieraus enorme Herausforderungen im Hinblick auf die künftige Sicherstellung der Wasserversorgung in den betroffenen Regionen (siehe Kapitel 2.4.1). (WWF, 2009)

Die Berücksichtigung der standortspezifischen sozio-ökonomischen und -kulturellen Rahmenbedingungen bei der Planung und Entwicklung einer technischen Einrichtung ermöglichen somit den (teilweisen) Ausgleich von fehlenden oder unzureichenden gesetzlichen Vorschriften und Regelungen. Aus diesem Grund ist eine Beteiligung der Wasserverbraucher vor Ort bei Planung, Auswahl und Umsetzung von Maßnahmen im Wassersektor sinnvoll, da dies entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung haben kann. Hierdurch wird ein nachhaltiger Betrieb überhaupt erst ermöglicht, da dieser nach Abzug aller externen Hilfen häufig durch die Nutzergruppen selbst erfolgen muss. (KfW, 2008)

Noch in den Achtzigerjahren wurde von vielen Experten gemeinhin die Meinung vertreten, die Themen Wasserknappheit bzw. Wassermangel seien mithilfe rein ingenieurtechnischer Ansätze zu bewältigen (Klaphake und Scheumann, 2001). Hierbei wurde in erster Linie auf die kostenintensive Erweiterung von technischen Kapazitäten in der Wasserversorgung und

Abwasserentsorgung gesetzt, welche durch öffentliche Behörden betrieben und mithilfe von Subventionen finanziert werden sollten (Klaphake und Scheumann, 2001). Beim Versuch, in Mangelregionen eine dauerhafte Wasserversorgung zu etablieren, führte diese Vorgehensweise jedoch zu erheblichen, teils unüberwindbaren Problemen. Fehlende finanzielle Mittel erschwerten oder verhinderten die Anschaffung technischer Anlagen und Maschinen, der Umgang mit ausgeklügelten *High-Tech*-Lösungen führte häufig zu einer technischen und/oder finanziellen Überforderung der lokalen Betreiber (Baumer, 1983).

Viele Länder bzw. Regionen konnten und können diese Hindernisse aufgrund mangelnden Problemlösungspotentials bzw. unzureichender Handlungskapazität nicht aus eigenem Antrieb überwinden – sie weisen sektorübergreifend ein sogenanntes *social ingenuity gap* auf (Klaphake und Scheumann, 2001). D.h. eine defizitäre gesellschaftliche Innovationsfähigkeit ist neben den technischen und wirtschaftlichen Einflussfaktoren häufig eine weitere Ursache für Wasserknappheit, nicht aber für Wasserarmut im eigentlichen Sinne (Klaphake und Scheumann, 2001). Betroffen von diesem Defizit sind nicht nur Infrastrukturprojekte der öffentlichen Hand sondern auch *Public Private Partnerships* (PPP, siehe Kapitel 2.2), Projekte, die in Zusammenarbeit von öffentlichen Einrichtungen und (internationalen) privaten Unternehmen oder wissenschaftlichen Institutionen zu deren beidseitigem Nutzen durchgeführt werden (BMZ, 2012). Missstände äußern sich bei der Projektplanung und -umsetzung u.a. durch das Fehlen adäquater Regel- und Normwerke sowie ungenügenden oder gänzlich fehlenden Daten als Planungsgrundlage (BMZ, 2006). Die Verteilung von Zuständigkeiten und Kompetenzen auf mehrere Behörden, ineffizientes Handeln durch stark ausgeprägte Hierarchien sowie fehlende kompetente und motivierte Entscheidungsträger sind Bedingungen, mit denen Projektplaner häufig konfrontiert werden (BMZ, 2006; Nestmann et al., 2012).

Diskussionen über mögliche Lösungsansätze konzentrieren sich daher häufig auf die Frage, wie geeignete Technologien beschaffen sein müssen und wie sie implementiert werden können, um unter den in der Zielregion gegebenen Bedingungen die Anforderungen der Nachhaltigkeit bzw. einer nachhaltigen Entwicklung zu erfüllen. Letztgenannte wurde im Jahr 1987 im Rahmen des Brundtland Reports definiert als „eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen“ (Lexikon der Nachhaltigkeit, 2015). Dieser Definition zufolge steht neben der Vermeidung negativer ökologischer oder ökonomischer Auswirkungen in der Gegenwart oder Zukunft die Anpassung der Technologie an die Bedürfnisse der heutigen Generation im Fokus. Anpassung ist hierbei das Stichwort: *Ernst Friedrich Schumacher* begründete 1973 in seinem wegweisenden Buch *Small is Beautiful* die Forderung nach sogenannten *intermediate technologies* (deutsch: Zwischenliegende oder angepasste Technologien) (Schumacher, 1973).

2.5 Angepasste Technologien und Technologietransfer

Zunächst impliziert der Ausdruck „Technologie“ die Eigenschaft einer *Hardware* in Form von Infrastruktur, Maschinen oder Werkzeugen. Wenngleich *Hardware* für den Betrachter nicht immer selbsterklärend ist, so vermittelt sie doch einen visuellen bzw. anschaulichen Eindruck ihres baulichen bzw. technischen Umfangs. Technologie geht jedoch weit über die Charakteristik einer *Hardware* hinaus und schließt somit auch immaterielle Eigenschaften – *Software* – wie Wissen, Erfahrung, Aus- und Weiterbildung, ökologische Verträglichkeit usw. mit ein. (Jéquier, 1976)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Somit kann Schumacher (1973) und Jéquier und Blanc (1983) zufolge eine erfolgreiche Implementierung von Technologien jedweder Art nur mit einer umfassenden Sichtweise erfolgen, wobei neben den naturräumlich-technischen Randbedingungen auch Einflüsse aus den Bereichen Ökonomie, Ökologie und Soziologie zwingend berücksichtigt werden müssen. Entscheidendes Kriterium ist hierbei, dass diese Technologien hinsichtlich Umsetzung, Betrieb und Instandsetzung einfacher und kostengünstiger als Lösungen hochentwickelter Regionen, jedoch nicht primitiv sind (Baumer, 1983). Zugleich sollen sie ausgeklügelter, effizienter, ressourcenschonender und wissenschaftlicher sein als die vorhandenen Technologien und Konzepte, da diese in der Vergangenheit keine Verbesserung der Mangelsituation ermöglichten (Schumacher, 1973; Baumer, 1983; Jéquier und Blanc, 1983).

Der nachhaltige Auf- bzw. Ausbau des Wassersektors erfordert jedoch nicht nur Lösungskonzepte auf Basis entsprechend angepasster Technologien, sondern auch deren Ansatz an unterschiedlichen Stellen der Wertschöpfungskette (VDI, 2008; Klaphake und Scheumann, 2001). Hierbei können im Wesentlichen drei Strategien definiert werden, welche jeweils eigene technologische Ansätze erfordern: Zur Minimierung des Wasserverbrauchs, zur Maximierung der Wasserverfügbarkeit sowie zur Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. Eine nachhaltige Implementierung dieser drei Strategien hängt jedoch maßgeblich davon ab, ob ein angemessener Transfer der anzuwendenden Technologie sowie des zugehörigen Wissens geleistet werden kann. *„Der Wissenstransfer wird unternommen, um beim Ziel des Transfers das gleiche Wissen herzustellen wie bei der Quelle des Transfers. [...] Zusätzlich zu dem eigentlichen Wissen müssen auch Kontextinformationen und verwandte Wissensbereiche übermittelt werden. Außerdem muss die Möglichkeit zu Rückfragen eingeräumt werden, um eventuelle Missverständnisse oder Transferstörungen zu beheben. Informationstransfer ist somit als ein Teilschritt des Wissenstransfers zu betrachten. Technologietransfer schließlich bezeichnet den Transfer einer bestimmten Art von Wissen, nämlich Wissen über eine Technologie“* (Gresse, 2010).

Entscheidend ist dabei, dass der Wissenstransfer nicht als unidirektionaler Prozess betrachtet werden kann, da durch Vorbereitung, Ablauf und Nachbearbeitung des Transfers ein bidirektionaler *„Wissensaustausch zwischen Quelle und Ziel“* erforderlich ist (Gresse, 2010). Die daraus resultierenden Herausforderungen werden durch Gerybadze (2003) zusammengefasst: *“Knowledge is distributed between groups of agents with diverse cultures and identities, with often incompatible value systems, who may interpret and respond to the same type of information quite differently. In most studies on knowledge management, we tend to overemphasize the rational, objective and content aspects of information, and we underestimate the interpretive, social and subjective aspects and the social process of knowledge sharing.”*

Vor diesem Hintergrund beschäftigte sich ein deutsch-indonesischer Verbund wissenschaftlicher Institutionen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern und Behörden aus beiden Ländern mit der Entwicklung innovativer Wassertechnologien und Managementstrategien (z.B. alternative Bau- bzw. Bewirtschaftungstechnologien), welche an das Können (Betrieb und Wartung) und die Bedürfnisse von Mensch und Natur in harmonischer Weise angepasst sind. Ziel war die exemplarische Implementierung der entwickelten Technologien in der Modellregion *Gunung Kidul, Java*, Indonesien, in Verbindung mit einem intensiven Wissenstransfer im Hinblick auf den nachhaltigen Betrieb der technischen Einrichtungen, welcher nach Abschluss der F&E-Aktivitäten selbstständig durch die indonesischen Partner erfolgen sollte. Diese Zielsetzung bzw. Vorgehensweise entspricht im Wesentlichen dem durch Khennas und Barnett (2000) formulierten Ansatz, welcher in drei Phasen unterteilt ist und sich in seiner ursprünglichen Bedeutung auf die

Realisierung von Kleinwasserkraftanlagen in Schwellen- und Entwicklungsländern bezieht, jedoch auch auf weitere Bereich des Wassersektors anwendbar ist.

- Hiernach wird in einer ersten Phase („*technological phase*“) die Technologie in der Modellregion exemplarisch implementiert, um ihre grundsätzliche Funktionsfähigkeit sowie ihr Anwendungspotential demonstrieren zu können.
- Die zweite Phase („*social phase*“) stellt die Akzeptanz der Bevölkerung – im Idealfall gleichbedeutend mit den Technologienutzern – für die künftige Anwendung der Technologie in den Mittelpunkt.
- Die dritte Phase („*financial phase*“) zielt maßgeblich auf die wirtschaftlich nachhaltige Nutzung der Technologie ab.

Im Falle des deutsch-indonesischen Verbundes sollten diese Ziele in der Modellregion mithilfe des integrativen und interdisziplinären Ansatzes „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) Indonesien“ erreicht werden, welcher nachfolgend beschrieben wird.

2.6 Das F&E-Verbundvorhaben „IWRM Indonesien“

2.6.1 Begriffsdefinition IWRM

In den 1980er-Jahren setzte sich unter Wasserexperten zunehmend die Erkenntnis durch, dass das Wassermanagement global unzureichend strukturiert ist und i.A. defizitär gehandhabt wird. Dieser Eindruck verstärkte sich bis in die 1990er-Jahre aufgrund der zunehmend negativen Entwicklungen im Wassersektor. Aufgrund der hohen Komplexität des Wasserkreislaufs ergaben sich mehrdimensionale, multisektorale und überregionale Aufgabenstellung. Erschwert wurde dieser Sachverhalt durch die Beteiligung mehrerer Interessensgruppen (englisch: *Stakeholder*) sowie durch die Existenz verschiedener konzeptioneller Lösungsansätze. Dem heutigen Verständnis zufolge kann nur durch einen geeigneten Ansatz für Abhilfe gesorgt werden, welcher sämtliche betroffenen Interessensgruppen des Wassersektors einschließt. In diesem Zusammenhang wurde das bereits in den 1940er-Jahren erarbeitete Konzept des „Integrierten Wasserressourcen-Managements“, kurz IWRM, neu entdeckt. (Biswas, 2004)

Im Jahr 1992 wurde das IWRM-Konzept im Rahmen der internationalen Konferenz „Wasser und Umwelt“ in Dublin als künftiges Leitkonzept internationaler Entwicklungspolitik festgelegt (gtz, 2009). Laut Definition sieht es ein ganzheitliches Wassermanagement zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung vor, wobei die Balance zwischen ökonomischer Effizienz, sozialer Gleichheit und ökologischer Nachhaltigkeit gewährleistet werden muss (gtz, 2009; Lenton, 2011). Gemäß der offiziellen Definition der *Global Water Partnership* (GWP) ist Integriertes Wasserressourcen-Management „*ein Prozess, der die koordinierte Entwicklung und ein koordiniertes Management von Wasser, Land, und den damit in Beziehung stehenden Ressourcen fördert und auf die Maximierung des ökonomischen und menschlichen Wohles unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit lebenswichtiger Ökosysteme abzielt*“ (BMZ, 2006a).

Die erfolgreiche Umsetzung dieses Prozesses erfordert „*die Partizipation aller relevanten Akteure an den sie betreffenden Entscheidungen*“ (BMZ, 2006a). Wenngleich somit alle Interessensgruppen ihre Kenntnisse, Erfahrungen und Meinungen einbringen können, sollen die

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

jeweiligen Entscheidungen jedoch gemäß dem Subsidiaritätsprinzip stets auf der niedrigsten angemessenen Ebene erfolgen (BMZ, 2006a; Lenton, 2011). Entscheidend ist dabei, dass das IWRM-Konzept nicht einen einzelnen, allgemein gültigen Lösungsansatz für ein nachhaltiges Wasserressourcen-Management bereitstellt, sondern bei einer Vielzahl an Lösungswegen als Grundgerüst bzw. Leitbild „guter Wasserpolitik“ dient (BMZ, 2006a). Wenngleich ein IWRM-Vorhaben auf verschiedenen Wegen umgesetzt werden kann, so gibt es doch zumindest vier Elemente, die alle IWRM-Projekte gemein haben (Lenton, 2011):

- Im IWRM-Ansatz wird anerkannt, dass Wasser sowohl ein soziales als auch ein ökonomisches Gut ist und eine Vielzahl an Funktionen erfüllen kann.
- Der IWRM-Ansatz strebt eine Balance zwischen verschiedenen Zielsetzungen an, die in ihrem Kern stets mit der Forderung nach ökonomischer Effizienz, sozialer Gleichheit und ökologischer Nachhaltigkeit verbunden sind.
- Der Ansatz beinhaltet eine breite, ganzheitliche und integrierende Betrachtungsweise für die jeweilige Ebene, in der anstehende Entscheidungen getroffen werden sollen.
- Der Ansatz erfordert eine angemessene Beteiligung betroffener Nutzer auf der jeweiligen Entscheidungsebene.

In der Entstehungsgeschichte des IWRM-Konzeptes gab es drei wesentliche Meilensteine. Durch das multidisziplinäre *Harvard Water Program* als ersten Meilenstein wurde ein wichtiges Werkzeug zur Handhabung komplexer Wassersysteme geschaffen, da es u.a. die ökonomische und ingenieurwissenschaftliche Bedarfs- und Machbarkeitsanalyse miteinander kombiniert und die Bedeutung politischer Prozesse bei der Entscheidungsfindung beschreibt. Der „Brundtland Report“ (1987) kann als zweiter Meilenstein betrachtet werden, da er umfassend die Erkenntnis des Einflusses menschlicher Aktivitäten auf den Zustand der Umwelt beschreibt. Durch die Entwicklung des IWRM-Konzeptes über mehrere Dekaden entstand als dritter Meilenstein ein großes Spektrum konzeptioneller und praxiserprobter Maßnahmen, deren Anwendung erhebliche Vorteile für ein umfassendes Mehrebenen-Management im Wassersektor birgt. (Lenton, 2011)

Bei aller Wertschätzung für das IWRM-Konzept gibt es jedoch auch kritische Stimmen, die den bewusst allgemein gehaltenen Ansatz aufgrund der fehlenden Festlegung fundamentaler Grundsätze als unpräzise, unbestimmt und impraktikabel beschreiben (Biswas, 2004). Dem wird entgegnet, dass, wenngleich das IWRM-Konzept von einigen Kritikern als Theorie beschrieben wird, die schwer in die Praxis umgesetzt werden kann, es auch als Praxisanwendung gesehen werden kann, die schwer durch eine Theorie zu beschreiben ist (Lenton, 2011). Unabhängig von der Sichtweise ist das IWRM-Konzept bis heute jedoch alternativlos, weshalb der erfolgreichen Umsetzung eines IWRM-Vorhabens zur nachhaltigen Verbesserung der Wasserversorgung in Bedarfsregionen eine ungebrochen große Bedeutung zukommt.

Als Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung eines IWRM-Vorhabens soll im Weiteren der seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte F&E-Verbund „Integriertes Wasserressourcen-Management in *Gunung Kidul, Java, Indonesien*“ vorgestellt werden, welcher den Rahmen für die Ausarbeitung der vorliegenden Schrift darstellte.

2.6.2 Ziele des Verbundvorhabens und der Dissertation

Eines der Millenniumsziele der Vereinten Nationen (englisch: *United Nations*, UN) aus dem Jahr 2000 ist die Halbierung des Anteils der Menschheit ohne gesicherten Trinkwasserzugang bis ins Jahr 2015. Wenngleich dieses Ziel bereits 2010 durch die Bereitstellung eines dauerhaften Zugangs zu einer Trinkwasserquelle für mehr als 2 Milliarden Menschen erreicht wurde, so leiden noch heute mehr als 780 Millionen Menschen unter teils existentiellm Wassermangel. Laut UN sind Gründe für Wasserknappheit insbesondere die erschwerte Zugänglichkeit von Wasserressourcen, unterentwickelte (Wasser-) Infrastrukturen, die zunehmende Weltbevölkerung sowie der steigende Pro-Kopf-Verbrauch (siehe Kapitel 2.2, 2.3 und 2.4). (UNICEF und WHO, 2012)

Den Ausführungen in Kapitel 2.3.3 zufolge ist insbesondere die eingeschränkte Zugänglichkeit von Wasserressourcen ein typisches Problem in Karstgebieten, welche ca. 20 % der weltweiten Landfläche einnehmen; mehr als 25 % der Weltbevölkerung sind dauerhaft auf eine Wasserversorgung aus Karstgrundwasserleitern angewiesen (Williams und Ford, 2006). Aufgrund hoher Infiltrationsraten des Karstuntergrunds sowie dem daraus resultierenden Mangel an Oberflächengewässern sind Karstgebiete jedoch häufig durch (extremen) Wassermangel gekennzeichnet. (Nestmann et al., 2012)

Gleichzeitig sind in den betroffenen Regionen teils enorme unterirdische Wasserressourcen vorhanden, welche für eine Verbesserung der lokalen Versorgungssituation erschlossen und bewirtschaftet werden könnten. Deren inhomogene Verteilung und tiefe Lage führt jedoch bereits bei der Exploration zu erheblichen Erschwernissen, wodurch selbst im Falle einer erfolgreichen Erschließung ein enormer technischer und finanzieller Aufwand häufig unvermeidbar ist (Nestmann et al., 2012). Zusätzlich führt die geringe Filterwirkung des Karstgesteins zu einer hohen Vulnerabilität der Karstwasserressourcen gegenüber anthropogenen Verunreinigungen sowie letztlich zu einer geringen Wasserqualität (Dittmann et al., 2011).

Die im Distrikt *Gunung Kidul*, Sonderprovinz *Yogyakarta* (DIY), an der südlichen Küste Zentral-Javas gelegene indonesische Karstregion *Gunung Sewu* leidet unter den genannten Problemen. Vor dem Hintergrund, dass 91 % der Bevölkerung *Gunung Sewus* ihren Lebensunterhalt durch die Landwirtschaft bestreiten (siehe Kapitel 2.6.5.1), ist der insbesondere in der Trockenzeit auftretende Wassermangel besonders kritisch (Dittmann et al., 2011). Obwohl sich die Menschen nicht auf den in Indonesien häufig anzutreffenden Reisanbau, sondern auf weniger wasserintensive Kulturen wie Soja, Maniok und Erdnüsse konzentrieren, bleibt die Wasserknappheit weiter eines der dringendsten Probleme der Region. Die indonesische Regierung hat über mehrere Dekaden enorme Anstrengungen unternommen, um die Lebensbedingungen der dort ansässigen Bevölkerung zu verbessern, jedoch ohne nachhaltigen Erfolg (Nestmann et al., 2012).

Noch immer leidet die Region unter Wassermangel, welcher insbesondere in der jährlichen Trockenzeit von Mai bis Oktober allgegenwärtig ist (siehe Kapitel 2.6.5.2). In dieser Zeit leben einige Haushalte mit einer täglichen Pro-Kopf-Wassermenge von weniger als 10 Litern (Scholz et al., 2004), wodurch eine Entwicklung der Region nach wie vor nur sehr begrenzt stattfindet. Dies hat zur Folge, dass viele Einwohner gezwungen sind ihre Heimat zu verlassen, wodurch es zum *Brain-Drain*-Effekt und somit zu Rückschlägen für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Region kommt (Nibbering, 1991). Daher wird die Region seit 2005 seitens der indonesischen Regierung unter den am stärksten benachteiligten Regionen des Landes geführt, was u.a. durch Bezeichnungen wie „Armenhaus *Javas*“ verdeutlicht wird (KEMENNEG PDT, 2005).

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Vor diesem Hintergrund erfolgte in einer ersten Projektphase der BMBF-geförderten F&E-Aktivitäten („Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer“, Laufzeit 2002 bis 2008) die Entwicklung und Implementierung einer unterirdischen Wasserförderanlage in der Karsthöhle *Gua Bribin* (indonesisch: Höhle *Bribin*) unter Nutzung hierfür entwickelter und an die lokalen Bedingungen angepasster Technologien (siehe Abbildung 2.9) (Nestmann et al., 2009). Die Nachhaltigkeit der Anlage ergibt sich aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht durch den Antrieb auf Basis rückwärtslaufender Pumpen („Pumpe als Turbine“, PAT), welche als Wasserkraftmaschinen zur Nutzung eines künstlich geschaffenen Wasserkraftpotentials eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.6). Diese invers betriebenen Kreiselpumpen sind mechanisch über ein Getriebe mit Hochdruck-Förderpumpen gekoppelt, um einen Teil des Höhlenabflusses an die Oberfläche zu fördern.

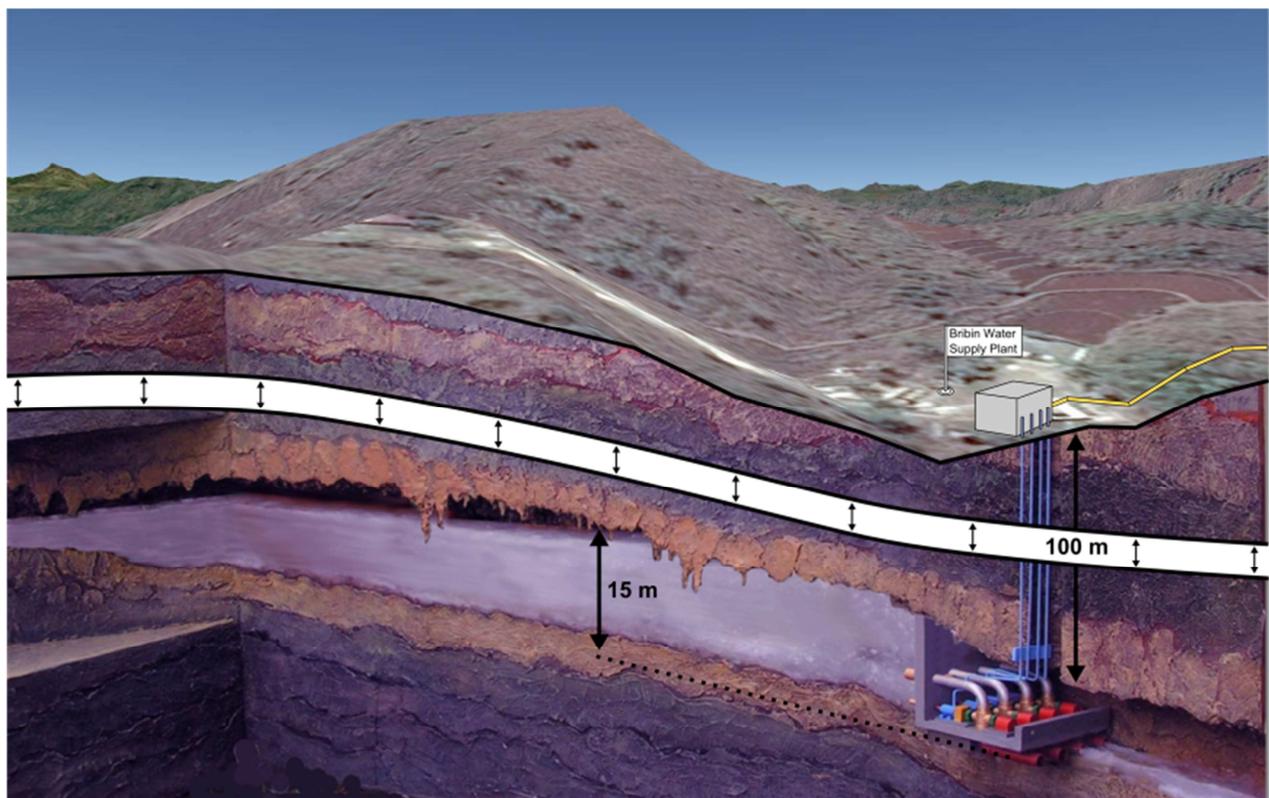


Abbildung 2.9: Schema der unterirdischen Wasserförderanlage *Bribin*, verändert nach Nestmann et al. (2009)

Aufbauend auf den Errungenschaften dieser ersten Projektphase schloss das nachfolgende IWRM-Vorhaben („Integriertes Wasserressourcen-Management in *Gunung Kidul, Java, Indonesien*“, Laufzeit 2008 bis 2014) alle maßgeblichen Bereiche einer nachhaltigen Wasserversorgung ein (Exploration, Förderung, Verteilung, Qualitätssicherung und Abwasserbehandlung).

Die IWRM-Aktivitäten boten weiterhin den Rahmen zur Ausarbeitung der vorliegenden Dissertation, welche ausschließlich in der 2. Projektphase entstand. Durch die nachfolgend zusammengefassten, maßgeblichen Arbeitsschritte sollte eine umfassende Daten- und Informationsbasis zur Entwicklung einer Methodik geschaffen werden, welche sich mit der Implementierung der in der Anlage *Bribin* eingesetzten Fördertechnologie in Schwellen- und Entwicklungsländern befasst:

- Zunächst stand die Unterstützung des lokalen Betriebspersonals bei der Inbetriebnahme der Förderanlage *Bribin* im Fokus, da aufgrund deren Innovationscharakters keinerlei Erfahrungswerte vorlagen. Der Schwerpunkt lag vornehmlich auf der Befähigung des Personals für den dauerhaften Betrieb des in der ersten Projektphase entwickelten und implementierten Fördersystems. Hierzu war u.a. die Ausarbeitung umfassender Schulungsunterlagen erforderlich, welche in enger Zusammenarbeit mit dem Personal abgestimmt und im Weiteren kontinuierlich ergänzt und aktualisiert werden sollten.
- Nach erfolgtem Beginn des Dauerbetriebs sollte insbesondere das Fördersystem eingehend analysiert werden. Der Fokus lag dabei auf der Bewertung technischer Kenngrößen (Förderrate, Wirkungsgrad, Abgleich mit Prüfstandmessungen usw.) und betrieblicher Aspekte (Ursachen und Dauer von Standzeiten, Ursache und Häufigkeit von Regelungsvorgängen, Einhaltung der Betriebsvorgaben usw.).
- Basierend auf der Analyse des Betriebsverhaltens sowie auf Basis umfassender Schadensanalysen bei Ausfall einzelner Komponenten und Maschinen sollten Maßnahmen zur Anpassung bzw. Optimierung abgeleitet werden, um einen nachhaltigen Betrieb gewährleisten zu können. Die Umsetzung und anschließende Evaluierung dieser Maßnahmen sollte in Abstimmung mit weiteren Teilprojekten des F&E-Verbundes (siehe Kapitel 2.6.3) sowie in Kooperation mit den indonesischen Betreibern erfolgen.
- Durch die Gesamtheit der gewonnenen Erkenntnisse sollte im Rahmen der Dissertation eine Bewertung des Multiplikationspotentials der Fördertechnologie im Hinblick auf weitere Bedarfsregionen in Schwellen- und Entwicklungsländern erfolgen. Darauf aufbauend sollte eine Methodik entwickelt werden, welche die Implementierung der in *Bribin* eingesetzten Fördertechnologie unter anspruchsvollen naturräumlich-technischen, sozio-ökonomischen und sozio-kulturellen Rahmenbedingungen zum Ziel hat. Hierbei galt es nicht zuletzt auch die administrativen und logistischen Anforderungen zu berücksichtigen, welche sich aus der organisatorischen bzw. institutionellen Einbindung der Förderanlage *Bribin* ergeben (siehe nachfolgendes Kapitel).

2.6.3 Verbundstruktur und -partner

Die Entwicklung angepasster Technologien, deren exemplarische Implementierung sowie die Durchführung eines umfassenden *Capacity Developments* für lokale Betreiber erforderte einen interdisziplinären Ansatz im Hinblick auf den nachhaltigen Betrieb der technischen Einrichtungen. Auf diese Weise kann die Expertise aus verschiedenen Fachbereichen in Bezug auf alle wesentlichen F&E-Bereiche des Wassersektors umfassend eingebunden werden. Hierbei war die Koordinierung aller F&E-Tätigkeiten sowohl durch eine übergeordnete Stelle als auch im Rahmen einer geeigneten Verbundstruktur erforderlich. Dies wurde durch eine sogenannte „3+3 Konzeption“ des Gesamtverbundes ermöglicht, welche gemäß den BMBF-Förderrichtlinien eine Kooperation mit deutschen und indonesischen Partnern aus den Bereichen Wissenschaft, Behörden und Industrie fordert.

Weiterhin wurde innerhalb des IWRM-Vorhabens eine übergeordnete Projektstruktur mit der Einteilung der insgesamt 19 eng miteinander vernetzten Teilprojekte in drei Arbeitsgruppen geschaffen. Durch die Untergliederung in thematisch abgegrenzte Einheiten ergaben sich Vorteile, insbesondere bei Fachdiskussionen innerhalb eines *Workpackages* (WP) sowie bei der Abstimmung der Sprecher einzelner Teilbereiche. Somit konnten Arbeitsabläufe besser

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

synchronisiert und Synergieeffekte zwischen den Teilprojekten sowie zwischen den *Workpackages* genutzt werden. Auf deutscher Seite waren neun Institute aus unterschiedlichen Fachdisziplinen des KIT, das Institut für Geografie der Justus-Liebig-Universität Gießen, das Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe, sowie sechs Industriepartner beteiligt.

Tabelle 2.2: *Workpackages* des IWRM-F&E-Verbundes

<i>Workpackage</i>	Arbeitsgebiet
1	Erkundung der Wasserressourcen / Wasserdargebot
2	Wassermengenbewirtschaftung
3	Wasserverteilung, Wasseraufbereitung, Wassergütesicherung
4	Abwasser- / Abfallbehandlung
5	Sozio-ökonomische Bewertung / Technikfolgenabschätzung
6	Umsetzung / Technologie- und Wissenstransfer (<i>Capacity Development</i>)
7	Koordination / GIS-Daten-Management (Geo-Informations-System)

Zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit des geplanten Technologie- und Wissenstransfers war die Einbindung strategisch wichtiger indonesischer Partner entscheidend. Bereits zu Beginn der F&E-Aktivitäten wurde daher im Rahmen einer BMBF-geförderten Machbarkeitsstudie durch den gezielten Aufbau von Kontakten auf unterschiedlichen administrativen und fachlichen Ebenen ein umfassendes Netzwerk mit den indonesischen Partnern gebildet.

Neben den zuständigen indonesischen Behörden (Zentralregierung, Provinz-, Distrikt- und Dorfebene), verschiedenen Forschungseinrichtungen und nichtstaatlichen Organisationen wurde insbesondere auch die lokale Bevölkerung über regelmäßige Koordinierungsgespräche und *Workshops* über die geplanten Aktionen informiert und in Entscheidungsprozesse wie bspw. Standortwahl für die geplante Förderanlage *Bribin* usw. eingebunden. Wenngleich die Beteiligung der indonesischen Partner bedeutsam war zur Realisierung der gesteckten Ziele des F&E-Verbundes, so nahmen durch das Mitwirken dieser öffentlichen Institutionen auch die Komplexität der Projektstruktur und Abhängigkeiten von politischen und strategischen Einflüssen zu. Die Koordinierung dieser Vielzahl von Institutionen und Unternehmen stellte somit eine enorme Herausforderung für den Gesamtverbund dar.

Zur Umsetzung der geplanten Projektstrategie bzw. -ziele erfolgte daher der Kontakt mit indonesischen Partnerinstitutionen übergeordnet durch die Verbundkoordination. Auf wissenschaftlich-operativer Ebene wurde jedem deutschen Teilprojekt ein Ansprechpartner auf indonesischer Seite zugeordnet. Diese bilaterale Kooperation unterstützte nicht nur den Projektfortschritt in besonderem Maße sondern bot auch gleichzeitig die Möglichkeit für einen kontinuierlichen Wissens- und Technologietransfer (*Capacity Development*).

Erschwert wurde die Zusammenarbeit mit öffentlichen Einrichtungen in Indonesien, welche Federführend durch das Ministerium für öffentliche Bauvorhaben (indonesisch: *Kementerian Pekerjaan Umum*, PU) koordiniert wurden, durch eine häufig auftretende Verschiebung von Zuständigkeiten (*tour of duty*, englisch: Dienst- oder Stationierungszeit), sowohl innerhalb einer Behörde als auch zwischen den Institutionen. Nachfolgend werden die wesentlichen Rahmenbedingungen in der Zusammenarbeit mit indonesischen Behörden dargelegt, welche im Projektverlauf deutlich wurden.

- Komplexe Projektstruktur und Verantwortlichkeiten
- Fehlende Kontinuität innerhalb der Organisationsstruktur
- Z.T. fehlende koordinative Verantwortlichkeit
- Aufwändige und unflexible Budgetplanung
- Teils divergierende Ansichten zur Projektumsetzung, z.B. Implementierung von innovativen Technologien im Rahmen von F&E-Vorhaben vs. konventionelle Implementierungs- und Konstruktionsmaßnahmen

Über die zuvor genannten Institutionen hinaus, deren Beteiligung innerhalb des IWRM-Verbunds von offizieller Natur war, gab es eine Vielzahl lokaler und regionaler Klein(st)unternehmen, die einen unverzichtbaren Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung geleistet haben. Auch das Mitwirken der lokalen Bevölkerung war von entscheidender Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf die Erfassung der soziologischen Entwicklungen, welche nicht zuletzt durch die Errichtung der Wasserförderanlage *Bribin* geprägt wurde.

In diesem Zusammenhang zeichnete insbesondere das Institut für Geographie der Justus-Liebig-Universität Gießen verantwortlich, dessen Mitarbeiter die umfassenden soziologischen Studien im Rahmen umfassender Feldstudien auf Basis „*qualitative[r] und quantitative[r] Methoden der empirischen Sozialforschung*“ in Zusammenarbeit mit lokalen (Wissenschafts-) Partnern durchgeführt und somit einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung des Verbundvorhabens geleistet haben (Hossu, 2013).

Im Weiteren soll zunächst die Modellregion *Gunung Kidul* bzw. das in der Region beheimatete Karstgebiet *Gunung Sewu* vorgestellt werden, um die vielfältigen Anforderungen für die Entwicklung und den Transfer angepasster Wassertechnologien veranschaulichen zu können.

2.6.4 Indonesien im Überblick

2.6.4.1 Lage und Bevölkerungsstruktur Indonesiens

Indonesien besteht aus über 14.000 Inseln, von denen ca. 6.000 bewohnt sind. Die Landfläche von mehr als 1,9 Millionen km², die etwa zu 12 % für Ackerbau und zu 10 % für Dauerkulturen genutzt werden, erstreckt sich beidseits des Äquators. Parallel zu den Küsten Indonesiens im Indischen Ozean erstreckt sich der ca. 6.000 km lange Sundabogen, an dem die indisch-australische Platte mit einer Geschwindigkeit von sechs bis sieben Zentimetern pro Jahr unter der eurasischen Platte subduziert (Subduktionszone) wird. Der Sundabogen gehört zu den aktivsten Plattengrenzen der Erde, wobei insbesondere die Subduktionszone im eigentlichen Sundagraben vor Indonesien ein starkes Erdbebenrisiko birgt. Diese hohe tektonische Aktivität formte eine Gebirgskette aus mehr als 300 Vulkanen, welche sich bogenförmig entlang des Sundabogens von der Südhälfte *Sumatras* über *Java* bis nach *Timor* erstreckt. Der südlichste, jüngste und auch aktivste von zahlreichen Vulkanen auf der indonesischen Hauptinsel *Java* ist der *Merapi*, welcher im Norden der Großstadt Yogyakarta bzw. im Nordwesten der Modellregion *Gunung Sewu* liegt. Aufgrund seiner dauerhaften Aktivität zählt der *Merapi* zu den 16 Hochrisiko-Vulkanen weltweit. Allein in den vergangenen Jahrhunderten wurden 67 Ausbrüche dokumentiert. Durchschnittlich ist alle sieben Jahre eine Eruption zu verzeichnen, wonach er als einer der aktivsten und zugleich gefährlichsten Vulkane weltweit gilt. (Hüttl, 2011)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Mit einer Einwohnerzahl von ca. 250 Millionen Menschen und einem jährlichen Bevölkerungswachstum von 1,49 % (Badan Pusat Statistik, 2011) rangiert Indonesien auf dem vierten Platz unter den bevölkerungsreichsten Nationen dieser Erde. Die höchste Besiedlungsdichte ist dabei auf der Insel *Java* zu verzeichnen, welche zwischen dem fünften und zehnten südlichen Breitengrad liegt und historisch bedingt das politische und ökonomische Zentrum der Nation darstellt. (Auswärtiges Amt, 2015)

Hier leben etwa 123 Millionen Menschen auf 6,6 % der indonesischen Landfläche – dies entspricht einer Besiedlungsdichte von fast 1.000 Menschen pro km² (Auswärtiges Amt, 2015). Selbst in ländlichen Regionen *Javas* leben über 300 Menschen auf einem Quadratkilometer (CIA, 2015), wodurch die Insel deutlich dichter besiedelt ist als viele westliche Nationen (Bevölkerungsdichte Deutschlands ca. 230 Menschen pro km²). Landesweit lag der Anteil der städtischen Bevölkerung im Jahr 2013 bei bereits 51 %. Aufgrund der aktuellen jährlichen Urbanisierungsrate von 2,45 % werden die Ballungszentren auch künftig stark wachsen, wodurch nicht zuletzt die Anforderungen in der Wasserver- und -entsorgung verstärkt werden (CIA, 2015).



Abbildung 2.10: Reliefkarte Südostasiens, Landfläche Indonesiens gelb-transparent gekennzeichnet (Banfi, 2012)

2.6.4.2 Politische Situation und Verwaltung

Nach mehr als 300 Jahren, in denen das Land durch die Kolonialisierung von Seiten der Niederlande sowie Besatzung durch japanische Streitkräfte (1942 bis 1945) geprägt wurde, erklärte Indonesien im Jahr 1945 seine Unabhängigkeit. Sowohl die dreijährige Besatzungszeit durch die Japaner als auch die nachfolgenden vier Jahre während des Unabhängigkeitskampfes fügten dem Land großen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Schaden zu. Die Auswirkungen dieser Zeit sind noch heute zu spüren, da aktuelle gesellschaftliche und politische Diskussionsthemen insbesondere die Bekämpfung der Armut, die Verbesserung der

Ausbildungen für junge Menschen sowie die Konsolidierung der noch jungen Demokratie betreffen; denn erst zum Ende des vergangenen Jahrtausends wurden in Indonesien die ersten freien und fairen Parlamentswahlen abgehalten. Heute ist Indonesien das drittgrößte demokratische Land und die größte muslimische Nation der Erde. (CIA, 2015)

Sitz der nationalen Regierung ist die im Westen Javas gelegene Hauptstadt *Jakarta*. Administrativ ist das Land in 31 Provinzen, den Hauptstadt distrikt sowie in zwei Sonderprovinzen unterteilt – hierzu zählt die Sonderprovinz *Yogyakarta* (indonesisch: *Daerah Istimewa Yogyakarta*, DIY), welche die Modellregion *Gunung Kidul* beheimatet. Aufgrund der seit 2001 realisierten Dezentralisierung werden die Provinzen politisch durch einen direkt gewählten Gouverneur geführt. (Auswärtiges Amt, 2015)

2.6.4.3 Wirtschaftliche Situation

Die indonesische Wirtschaft wuchs in den Jahren 2010 bis 2012 jährlich um mehr als 6 %. Selbst während der globalen Wirtschaftskrise im Jahr 2008 ließ Indonesien seine Nachbarstaaten hinter sich und verzeichnete weiterhin stetes Wachstum. Dennoch gehören auch heute noch Themen wie Armut, Arbeitslosigkeit, eine unzureichende Infrastruktur, Korruption sowie eine ungleiche Ressourcenverteilung zwischen den einzelnen Regionen zur Tagesordnung. Die Arbeitslosenquote lag im Jahr 2012 bei 6,1 %, die Inflationsrate bei 4,3 %, Tendenz jeweils steigend. Hierdurch lag der Anteil der Bevölkerung, der aufgrund seines geringen Einkommens unterhalb der Armutsgrenze anzusiedeln ist, bei fast 12 %. Generell teilt sich die erwerbstätige Bevölkerung auf die Bereiche Landwirtschaft (38,9 %), Industrie (22,2 %) sowie allgemeine Dienstleistungen (47,9 %) auf. Im Landwirtschaftssektor sind die am häufigsten erzeugten Produkte Reis, Maniok, Kautschuk, Palmöl, Forsterzeugnisse, Kakao, Kaffee und Gewürze. Die Industrie konzentriert sich vorwiegend auf die Erzeugung von Erdöl und Erdgas, Textilien, Elektroartikel, Rohstoffabbau und Handwerksarbeiten. (CIA, 2015)

Laut gta (2012) fehlt es in den meisten Branchen an Fachkräften, was größtenteils auf das nach wie vor defizitäre Bildungssystem zurückgeführt werden kann. Ohne umfassende Reformen im Bildungssektor ist vor dem Hintergrund des starken Bevölkerungswachstums künftig mit einem zunehmenden Fachkräftemangel zu rechnen. Nicht zuletzt auch durch die Bestrebungen der Regierung, die Industrie und dadurch den Wohlstand der Menschen zu fördern, nimmt die Belastung der Umwelt und somit auch des Wassers zu. In vielen landwirtschaftlich geprägten Regionen führte bspw. die mangelhafte Lagerung von Pestiziden und Düngemitteln zu einer enormen Umweltbelastung. In industriell geprägten Regionen hingegen hatte das schnelle Wirtschaftswachstum eine deutliche Steigerung der (ungeklärten) Abwassermengen zur Folge.

Untersuchungen der Weltbank (2003) zufolge stellt in Indonesien der Berg- und Tagebau aufgrund des enormen Rohstoffvorkommens einen der wichtigsten Industriezweige dar, wobei die Abbaustätten vielerorts zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Umwelt führen. Dabei ist das Verhältnis aus Produktionskapazität zu Umweltbelastung im Kleinbergbau beispielsweise durch Spülwässer deutlich ungünstiger als bei großen Abbaustätten. Zuletzt stiegen jedoch gerade die Zahl an Kleinbetrieben und somit auch die lokale Umweltbelastung deutlich an. In der Modellregion *Gunung Kidul* sind über den Kalkabbau hinaus lediglich kleinere Unternehmen aus dem Bau- und Dienstleistungsgewerbe sowie kleine produzierende Gewerbe ansässig (Dittmann et al., 2011). Im Hinblick auf die in der vorliegenden Arbeit diskutierte wasserkraftbetriebene Karstwasserrförderung birgt der Berg- und Tagebau in Karstregionen erhebliche Risiken, da eine Beeinflussung der Fließcharakteristik der unterirdischen Karstflüsse durch lokale morphologische

Veränderungen möglich ist. Aufgrund der hohen Relevanz dieser Thematik wurde seitens des KIT im Rahmen einer umfassenden hydrologischen Studie eingehend geprüft, ob eine solche Einflussnahme auch in der Modellregion *Gunung Kidul* gegeben ist (siehe Kapitel 2.6.5.3) (Brunsch et al., 2011).

2.6.4.4 Der indonesische Energiemarkt

Aufgrund des hohen Bevölkerungswachstums sowie aufgrund der Bestrebungen der indonesischen Regierung, die Armut zu bekämpfen und den Wohlstand zu fördern, stieg der Energiebedarf in den vergangenen Jahrzehnten stetig z.T. mit jährlichen Steigerungsraten von bis zu 9,7 %. Die Primärenergieträgernachfrage war daher dauerhaft einer starken Progression unterworfen, wobei die Anteile von Erdöl und Gas am deutlichsten stiegen. In Indonesien dominiert unter den Primärenergieträgern Erdöl mit 33 %, gefolgt von erneuerbaren Energien und Abfall (32,5 %), Gas (19 %) und Kohle (15,5 %). (gtz, 2009a)

Obwohl Indonesien als rohstoffreiches Land einer der größten Kohleexporteure der Welt ist, darüber hinaus hervorragende Standortbedingungen für die Erzeugung regenerativer Energien aufweist und somit seinen Energiebedarf selbst decken könnte, ist die Nation Netto-Energie-Importeur und somit abhängig von anderen Staaten – u.a. im Hinblick auf die Versorgungssicherheit ein unhaltbarer Zustand. Der Strommix setzte sich im Jahr 2006 aus thermischen Kraftwerken (88 %), Wasserkraft (7 %), Windenergie (1,4 %) und sonstigen Energiequellen (3,6 %) zusammen. Darüber hinaus zielen Bestrebungen der Regierung auf einen Einstieg in die Kernkraft bis ins Jahr 2017 ab. (gtz, 2009a)

Landesweit beliefen sich die energetischen Netzverluste im Jahr 2008 auf ca. 10,6 % und lagen somit um mehr als das Doppelte über international gängigen Werten von 3 bis 5 %. Hinzu kommt die sektorübergreifende gesteigerte Energienachfrage von durchschnittlich jährlich 8 %, welche alleine im Zeitraum von 1996 bis 2006 zu folgenden Steigerungsraten führte: Industrie +117 %, gewerblicher Sektor +75 %, private Haushalte +35 %. (gtz, 2009a)

Vor diesem Hintergrund wurde die indonesische Bevölkerung bereits im März 2009 durch den Staatspräsidenten aufgefordert, sich um eine höhere Energieeffizienz zu bemühen, da andernfalls eine Überschreitung der Produktionskapazitäten wahrscheinlich geworden wäre. Stromausfälle in zunehmender Häufigkeit sind jedoch gerade auf der Hauptinsel *Java* ein bekanntes Problem. Neben überlastbedingten Ausfällen kommt es in den bereits elektrifizierten Gebieten *Javas* zu einer bedarfs- bzw. lastabhängigen, regional begrenzten Abschaltung des „*Java-Bali-Netzes*“ (englisch: *rolling blackout*), um einer Überlastung vorzubeugen. Zusätzlich werden die erforderlichen Veränderungen des Strommarktes durch anhaltende Spannungen zwischen der Zentralregierung in *Jakarta* und den Regionalregierungen behindert, welche im Zusammenhang mit der Gewinnaufteilung aus dem Rohstoffhandel stehen. Auch die Fragmentierung des Landes erschwert zusätzlich den Aufbau, Ausbau und Betrieb, wodurch das indonesische Stromnetz als vergleichsweise komplex und kostenintensiv gilt. Insgesamt besteht es aus mehr als 600 isolierten Netzen sowie aus acht überregionalen, vernetzten Systemen. Das *Java-Bali-Netz* stellt das größte System dar und transportiert mehr als 80 % des landesweiten Stromverbrauchs. Netzbetreiber ist das indonesische Unternehmen *PT. Perusahaan Listrik Negara* (PLN), welches landesweit nahezu das Monopol (Marktanteil 86 %) bei den Übertragungs- und Verteilnetzen innehat. Die restlichen Anteile werden durch unabhängige Stromerzeuger, sogenannte *Independent Power Producer* (IPP), gewonnen. (gtz, 2009a)

Vor dem Hintergrund der steigenden Nachfrage nach elektrischer Energie ist die Regierung bemüht, IPP den Marktzugang zu ermöglichen und somit die Schaffung eines wettbewerbsorientierten Marktes voranzutreiben. So wurde eine Liberalisierung des Endkundenmarktes angestrebt, wonach lokale Stromproduzenten Endabnehmer direkt versorgen können und das Unternehmen PLN nur indirekt beteiligt ist, da die Netze nach wie vor im Besitz des Marktführers sind. Aufgrund der starken Auswirkungen der Asienkrise in den Jahren 1997 bis 1998 auf die Zahlungsfähigkeit der PLN sowie aufgrund der teils unsicheren Rechtslage hinsichtlich des Energiesektors sahen ausländische Investoren in den Folgejahren häufig von einem Engagement in Indonesien ab. Ähnliche Szenarien wie nach der Asienkrise sind daher auch in Zukunft nicht ausgeschlossen, wodurch im Falle der Zahlungsunfähigkeit seitens PLN die Gefahr einer landesweiten Energiekrise droht. Laut gtz (2009a) hat die indonesische Regierung daher eine umfassende Energiestrategie entwickelt, welche die fünf nachfolgenden, wesentlichen Punkte zur Stärkung des Energiesektors beinhaltet:

- Durch die Diversifizierung von Energiequellen soll die Energiebereitstellung mittels konventioneller als auch erneuerbarer Energien ökonomisch optimiert und die Ressourcen geschont werden.
- Mithilfe eines Programms zur intensiven Ressourcensuche sollen weiterhin die Reserven an Primärenergieträgern vergrößert werden.
- Innerhalb der Bevölkerung und der Industrie werden darüber hinaus enorme Anstrengungen zur Energieeinsparung (u.a. durch Prozessoptimierung und den Einsatz effizienterer Technologien) unternommen.
- Mittels Anpassung des Energiepreises an den Marktpreis sowie durch Verbraucherschutzmaßnahmen soll im Weiteren eine gerechte Energieverteilung innerhalb der Bevölkerung erzielt werden.
- Übergeordnet steht das Ziel einer nachhaltigen und ökologisch verträglichen Entwicklung, die auf allen gesellschaftlichen Ebenen verfolgt werden soll. Im Hinblick auf die Bestrebung zur Dezentralisierung des Energiemarktes birgt dies jedoch auch erhebliche ökologische Gefahren, da regionale Regierungen technisch und organisatorisch leichter überfordert sein können als überregionale oder zentrale Behörden. Darüber hinaus können finanzielle Anreize bei privaten Stromproduzenten zu einer Priorisierung führen, die einem Schutz der Umwelt entgegensteht.

In diesem Zusammenhang ist auch die bereits im Jahr 2005 von Seiten der indonesischen Regierung verabschiedete *Blueprint*-Energiestrategie zur Förderung erneuerbarer Energien zu nennen, welche eine deutliche Reduzierung des Mineralöleinsatzes bis ins Jahr 2025 sowie eine Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien auf 4 % bis ins Jahr 2020 vorsieht. Aufgrund der hohen Kapital- und Technologieanforderungen wird die Realisierbarkeit der ambitionierten Ziele der indonesischen Regierung unter Experten durchaus skeptisch betrachtet. Die *Blueprint*-Energiestrategie sieht weiterhin vor, der geringen Elektrifizierungsrate in ländlichen Gebieten durch den Einsatz erneuerbarer Energien entgegenzuwirken. Diese lag im Jahr 2008 bei gerade einmal 54 % und soll bis ins Jahr 2020 auf 90 % erhöht werden. Des Weiteren ist vorgesehen, alte emissionsintensive Dieselgeneratoren durch Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien zu ersetzen. Je nach Standort sollen die Neuanlagen sowohl ohne (englisch: *Off-grid*) als auch mit Anschluss an das Stromnetz (englisch: *On-grid*) ausgeführt werden. (gtz, 2009a)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Aufbauend auf den bereits existierenden Plänen wurde im Jahr 2011 von Seiten der indonesischen Regierung die sogenannte "Vision 25/25" veröffentlicht, welche die beiden Hauptziele Energieeinsparung und Energiediversifizierung verfolgt. Im Rahmen dieser Vision gab die Regierung zur Verbesserung des Energiemanagements als Ziel aus, bis 2025 die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien auf 25 % sowie die Reduzierung des Anteils der industriellen Energienachfrage um 33,9 % zu erreichen. Die Umsetzung erfordert neben hohen Investitionen auch die organisatorische Unterstützung durch nationale und internationale Institutionen. Als vielversprechenden Ansatz sehen Experten die Reduktion der Ölsubventionen sowie die Etablierung eines vergleichbaren Subventionssystems im Bereich erneuerbarer Energien. Mithilfe der Subventionierung erneuerbarer Energien wird eine Erhöhung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit im Vergleich zu fossilen Energieträgern ermöglicht. Die hierfür erforderliche enge Zusammenarbeit verschiedener Ministerien ist jedoch eine weitere Herausforderung, welche in diesem Zusammenhang bewältigt werden muss. (EKONID, 2013)

2.6.4.5 Wasserversorgung mit dem Fokus auf Karstgebieten

Die Frischwasserreserven Indonesiens sind enorm, sie entsprechen ca. 6 % der weltweiten Süßwasservorräte. Regional betrachtet ist jedoch die Versorgungssituation der Bewohner aufgrund der geografisch und saisonal ungleichen Verteilung der Wasserressourcen teils sehr unterschiedlich. Diese ungleiche Verteilung hat auch unmittelbaren Einfluss auf die Wasserqualität, da eine hohe (anthropogene) Belastung bei geringeren Wassermengen einen deutlich höheren Verschmutzungsgrad zur Folge hat. (Weltbank, 2003)

Trotz jahrelanger großer Anstrengung seitens nationaler und internationaler Institutionen sind in Indonesien wie auch in vielen weiteren Schwellen- und Entwicklungsländern die Lösungsansätze für eine nachhaltige Wasserversorgung aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht noch immer unzureichend. Hiervon sind insbesondere Karstregionen betroffen, welche in nahezu allen Landesteilen Indonesiens beheimatet sind (siehe Abbildung 2.11) und in Summe ca. 10 % der Landesfläche einnehmen (Nestmann et al., 2010a). Untersuchungen seitens des IWRM-Indonesien-Verbundes ergaben, dass viele durch Wassermangel geprägte Regionen über ausreichende unterirdische Ressourcen zur Versorgung der lokalen Bevölkerung verfügen (Nestmann et al., 2010; Nestmann et al., 2010a). Bereits heute sind viele Standorte durch Umweltverschmutzung geprägt, weshalb der Überprüfung der Wasserqualität im Vorfeld etwaiger Förderaktivitäten eine hohe Priorität zukommt. Auch die Kontamination küstennaher Süßwasservorräte durch eindringendes Salzwasser kann die Nutzbarmachung erschweren oder verhindern. Somit ist im Hinblick auf eine nachhaltige Wasserversorgung neben der Verfügbarkeit insbesondere auch die Wassergüte entscheidend.

Maßgebliche Einflussgrößen sind dabei neben den lokalen Geofaktoren u.a. auch die Art und Effizienz der eingesetzten sanitären Anlagen sowie der Technologien zur Abwasserbehandlung. Allgemein weist Indonesien eine der geringsten Kanalisationsdichten weltweit auf, weshalb Abwässer häufig ungeklärt verbleiben. Beispielsweise wurden bis 1998 Kanalisationssysteme von der Förderung durch Bundesmittel ausgenommen. *Java*, als indonesisches Zentrum der Industrie sowie Heimat eines Großteils der Bevölkerung, war und ist davon stark geprägt. Wenngleich kaum verlässliche Daten über die Abwasserbehandlung und Hygienefragen in Indonesien verfügbar sind, gilt es als annehmbar, dass etwa die Hälfte der Bevölkerung über eigene Toiletten – sogenannte „*septic tanks*“ – verfügen. Die andere Hälfte ist auf öffentliche Einrichtungen angewiesen und ist daher teils erheblichen Gesundheitsrisiken ausgesetzt. Jedoch ist auch im Falle eines Hauswasseranschlusses häufig mit Qualitätsproblemen zu rechnen, da

das Leitungswasser i.d.R. als nicht trinkbar eingestuft wird. Auch hierzu fehlen meist verlässliche Daten zur umfassenden Analyse und Bewertung. Häufig sind jedoch gerade in Ballungsgebieten mit einer Vielzahl an informellen Siedlungen (englisch: *Slums*, siehe Kapitel 2.4.1) Menschen aus den ärmsten Gesellschaftsschichten beheimatet, welche vergleichsweise hohe Wasserpreise für i.d.R. mindere oder gar gesundheitsgefährdende Qualität bezahlen müssen. (Weltbank, 2003)



Abbildung 2.11: Verteilung von Karstgebieten in Indonesien und Kennzeichnung der Hauptinsel Java, verändert nach Nestmann et al. (2010a)

Wenngleich Indonesien über Umweltschutzgesetze verfügt, so steht im Falle der Missachtung einer erfolgreichen rechtlichen Verfolgung eine Vielzahl an Hindernissen entgegen. Hierzu gehören Unstimmigkeiten zwischen einzelnen Behörden, eine schwache Datengrundlage durch fehlendes bzw. ungenügendes *Monitoring* sowie mangelnde technische Möglichkeiten zum Nachweis der Missachtung. Eine Bestrafung der Verursacher von Umweldelikten entfällt somit in vielen Fällen. Durch die Bestrebung der indonesischen Regierung hin zur Dezentralisierung vieler Kernkompetenzen besteht die Hoffnung, dass die räumliche Nähe der Entscheider zu den Problemen eine schnellere Umsetzung von Lösungsansätzen ermöglicht. Doch auch diese Vorgehensweise ist zweischneidig, denn durch die Dezentralisierung von Kompetenzen gibt es auch keine übergeordnete Stelle, die aus verschiedenen Regionen des Landes Daten für ein flächendeckendes *Monitoring* bezieht. Hierdurch wird es deutlich schwieriger bzw. unmöglich künftig ein landesweites Bild der Wasserqualität in Indonesien aufzuzeigen. (Weltbank, 2003)

In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Gesetze, Dekrete und Richtlinien erlassen, mit dem Ziel, die Umweltverschmutzung – insbesondere die Verunreinigung der Gewässer – zu reduzieren. Eine der größten Schwierigkeiten war dabei, die Umweltschutzpolitik mit der Beibehaltung einer dauerhaften positiven Entwicklung der Industrie in Einklang zu bringen. Strategien wie das *Clean River Program* (indonesisch: *Program Kali Bersih*, PROKASIH) wurden bereits 1989 umgesetzt, scheiterten jedoch häufig durch die oftmals freiwillige Teilnahme der Unternehmen bzw. der Bevölkerung. Auch verfolgten die Erlässe nicht selten sehr ambitionierte Ziele, weshalb ein Scheitern oft unausweichlich war. (Weltbank, 2003)

Aufgrund ausbleibender Fortschritte in Bezug auf die Entwicklung von Konzepten und Strategien zur Verbesserung der Wasserversorgungssituation in Mangelgebieten Indonesiens gab es in den vergangenen Jahrzehnten vielseitige Bestrebungen internationaler Institutionen, um die indonesischen Behörden hinsichtlich einer Verbesserung dieser Situation technisch, finanziell und strategisch zu unterstützen. Diese Hilfsleistungen konzentrierten sich jedoch meist auf die Konzepterstellung und endeten i.d.R. vor deren praktischer Umsetzung (gtai, 2012). Aufgrund

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

technischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Einschränkungen der indonesischen Partner konnte eine anschließende eigenständige Implementierung jedoch meist nicht realisiert werden. Daher kam es häufig zu rein monetärer Unterstützung (Darlehen oder Subvention) durch internationale Geberinstitutionen, was im günstigsten Fall eine räumlich und zeitlich begrenzte Linderung der Probleme mithilfe konventioneller Technologien zur Folge hatte (gtai, 2012). Im ungünstigsten Fall verschwinden die bereitgestellten finanziellen Mittel auf nicht nachvollziehbaren Wegen, da Indonesien seit vielen Jahren weltweit gesehen eine der am stärksten ausgeprägten Korruptionskulturen aufweist (Kucher, 2015). Auch nach Ende der Suhartoära konnte dieses gesellschaftliche Problem nicht durch die Umsetzung der Dezentralisierung gelöst werden (siehe Kapitel 2.6.4.2), wonach eine rein monetäre Unterstützung von externen Stellen auch heute noch keinen zielführenden Ansatz darstellt.

2.6.5 Die Modellregion *Gunung Kidul*

2.6.5.1 Geografische und wirtschaftliche Lage

Durch derlei Herausforderungen war und ist auch der in 18 Verwaltungseinheiten (indonesisch: *Kecamatan*) gegliederte Verwaltungsdistrikt (indonesisch: *Kabupaten*) *Gunung Kidul* geprägt, welcher als Modellregion für das IWRM-Indonesien-Vorhaben ausgewählt wurde. Mit einer Bevölkerungsdichte von 505 Einwohnern pro Quadratkilometer liegt die an der Südküste Zentral-Javas beheimatete, in der Sonderprovinz *Yogyakarta* (indonesisch: *Daerah Istimewa Yogyakarta*, DIY) gelegene Region deutlich unter dem Schnitt Javas. (Dittmann et al., 2011)



Abbildung 2.12: Die indonesische Hauptinsel Java und der Bezirk *Gunung Kidul*¹²

Bei einer Fläche von ca. 3.000 km² weist *Gunung Kidul* eine maximale Ausdehnung von 85 km in Ost-West-Richtung auf und lässt sich Lehmann (1936) zufolge in vier geologische Einheiten untergliedern (siehe Kapitel 2.6.5.3). Im Norden liegt die Vulkankette des *Baturagung*-Massivs, welche den Distrikt *Gunung Kidul* von den eigentlich für *Java* typischen fruchtbaren Reisbauebenen abgrenzt. Im Zentrum *Gunung Kiduls* befindet sich das *Wonosari*-Plateau. Im Osten liegt das *Panggung*-Massiv und im Süden schließt sich die Karsthügellandschaft *Gunung Sewu* (indonesisch: Land der tausend Hügel) an.

¹² Kartographie des Instituts für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen

Trotz des geringen landwirtschaftlichen Potentials der Region ist die Subsistenzwirtschaft bislang nahezu alternativlos, da es aufgrund fehlender Industrieniederlassungen nahezu keine weiteren Einnahmemöglichkeiten für die Bevölkerung gibt (Dittmann et al., 2011). So sind ca. 91 % der Bewohner *Gunung Sewus* als einfache Bauern tätig. Erschwert wird die landwirtschaftliche Nutzung durch die im Schnitt 30 Karsthügel pro Quadratkilometer (siehe Kapitel 2.6.5.3), wodurch sich ein erheblich höherer Aufwand bei der Bewirtschaftung ergibt bei bislang nahezu nicht existenter Automatisierung (siehe Abbildung 2.13).

Der vorherrschenden Wasserknappheit zum Trotz sind eines der landwirtschaftlichen Haupterzeugnisse aus *Gunung Kidul* Nahrungsmittel auf Basis von Sojabohnen, welche vergleichsweise große Wassermengen für den Herstellungsprozess erfordern (Dittmann et al., 2011). Da die prozessbedingten Abwasserströme eine starke organische Belastung aufweisen und i.d.R. nicht oder nur unzureichend behandelt werden, sind insbesondere im Bereich der *Gunung Sewu* lokale Verunreinigungen des Karstaquifers unvermeidlich (Dittmann et al., 2011). Über mehrere Dekaden wurden seitens der indonesischen Regierung enorme Anstrengungen unternommen, um die Lebensbedingungen der dort ansässigen Bevölkerung zu verbessern. Diese blieben jedoch ohne nachhaltigen Erfolg, wodurch die resultierenden wirtschaftlichen und sozialen Einschränkungen zu hohen Abwanderungsraten (englisch: *Brain Drain*, siehe Kapitel 2.4.2) der jungen Bevölkerungsschichten in Richtung der nahegelegenen Ballungszentren (insbesondere *Yogyakarta*) führten (Dittmann et al., 2011). Seit 2005 wird die Region daher von Seiten der indonesischen Regierung unter den am stärksten benachteiligten Regionen des Landes geführt (KEMENNEG PDT, 2005).



Abbildung 2.13: Einheimische bei der Feldarbeit ohne (links) und mit Einsatz von Nutztieren (rechts)¹³

2.6.5.2 Klima und Hydrologie

Die Modellregion *Gunung Kidul* liegt in der Klimazone der winterfeuchten Tropen. Das dortige Klima wird maßgeblich von Windzirkulation und Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre beeinflusst. Die jährlichen mittleren Niederschläge in der Region liegen bei ca. 2.000 mm, wobei die räumliche Niederschlagsverteilung an die Höhenlagen gebunden ist und sich in Abhängigkeit der Nähe zum Indischen Ozean ändert (siehe Abbildung 2.14). Bedingt durch die tropische Windzirkulation (Monsunwinde) ändert sich die zeitliche Verteilung mit den beiden Jahreszeiten, der Regen- und der Trockenzeit. Die Regenzeit liegt im Zeitraum Dezember bis März, die Trockenzeit in den Monaten Juni bis September; Übergangszeiten sind die Monate Oktober/November und April/Mai. (MacDonald & Partners, 1984)

¹³ Abbildungen des Instituts für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Die statistisch gesehen trockenste Zeit des Jahres ist der Monat August mit im Mittel 23 mm Monatsniederschlag. Nicht selten werden in der Trockenzeit jedoch auch vollkommen niederschlagsfreie Monate verzeichnet. Abbildung 2.16 zeigt die mittleren Monatsniederschläge der Region *Gunung Kidul*, welche im Rahmen einer Sekundärdatenanalyse des KIT für die Jahre 1952 bis 2009 ermittelt wurden (Brunsch et al., 2011). Diese Analyse war Teil einer umfassenden hydrologischen Studie in der Modellregion, welche im Rahmen des IWRM-Verbundvorhabens durchgeführt wurde. Die wesentlichen Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargelegt.

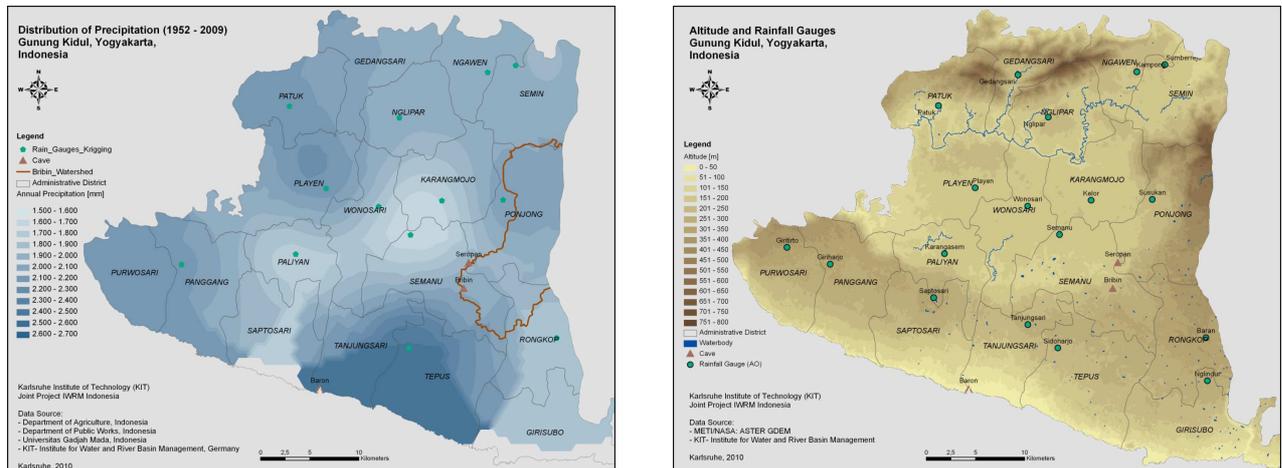


Abbildung 2.14: Niederschlagsverteilung (links) und Topografie (rechts) *Gunung Kidul*s auf Basis der Zeitreihe 1952 bis 2009, verändert nach Brunsch et al. (2011)

Eine Einflussgröße auf die lokale Wasserverfügbarkeit ist die Evapotranspiration, welche die Verdunstung von freien Wasserflächen und unbewachsener Erdoberfläche (Evaporation) sowie die Abgabe von Wasser durch Pflanzen (Transpiration) zusammenfasst. Diese Größe ist abhängig von der Höhenlage über Meeresspiegel, Sonnenscheindauer, Strahlungsintensität, Vegetationsdichte, Bodenfeuchte und Bodenbeschaffenheit sowie Temperatur und Windgeschwindigkeit. Für die Modellregion wurde eine jährliche potentielle Evapotranspiration von 1.500 mm bis 1.650 mm berechnet. (MacDonald & Partners, 1984)

Die in der Region gemessenen Temperaturen weisen lediglich eine geringe jahreszeitliche und räumliche Schwankung auf. Höchsttemperaturen treten in den Monaten April und Mai sowie im Oktober und November auf, wobei der Jahresdurchschnittswert bei 27°C auf Meereshöhe liegt und mit je 100 m zunehmender Höhe um ca. 0,6°C fällt; im Tagesgang unterliegen die Temperaturen i.d.R. Schwankungen zwischen 22°C und 32°C. Die Mittelwerte der jährlichen relativen Luftfeuchte liegen zwischen 80 % und 85 %, wobei Schwankungen lediglich zwischen Regen- und Trockenzeit zu verzeichnen sind. (MacDonald & Partners, 1984)

Hydrologische Studie des KIT

Eine entscheidende Grundlage für die Entwicklung angepasster Technologien und IWRM-Strategien sind umfassende Kenntnisse der hydrologischen Gegebenheiten der Zielregion. Bereits im Vorgängerprojekt des IWRM-Vorhabens (siehe Kapitel 2.6.2), welches sich auf den Bau einer am unterirdischen Karstfluss *Bribin* gelegenen Wasserförderanlage konzentrierte, wurden umfangreiche Untersuchungen u.a. der hydrologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen *Gunung Sewus* durchgeführt.

Besonderes Augenmerk galt dabei der Abflusscharakteristik des Flusses als Bemessungsgröße für das Anlagenkonzept, welches den Einsatz von Wasserkraft als Energiequelle für die Wasserförderung vorsieht. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse konnte die Rückhaltewirkung durch temporäres Auffüllen des Karstaquifers in der Regenzeit sowie dessen sukzessive Entwässerung über die anschließende Trockenzeit nachgewiesen werden. Dies führt dazu, dass der Fluss – wie auch viele weitere unterirdische Karstflüsse in der Region – trotz sehr geringer Niederschläge in der Trockenzeit ganzjährig wasserführend ist. In diesem Zusammenhang wurde auf Basis von Erkenntnissen, welche im Rahmen einer BMBF-geförderten Machbarkeitsstudie des KIT (2000 bis 2002) gewonnenen wurden, die gegen Ende der Trockenzeit auftretende Mindestabflussmenge des Flusses *Bribin* mit 1 m³/s definiert (siehe Kapitel 3.6). Jedoch wurde während der Implementierungsphase in mehreren aufeinander folgenden Jahren der zugrunde gelegte Mindestabfluss in der Trockenzeit um bis zu 30 % unterschritten. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen rückläufiger Abflussmenge und Leistungsfähigkeit der Förderanlage waren demnach weiterführende Untersuchungen im Hinblick auf mögliche Ursachen erforderlich. Mithilfe einer umfangreichen Sekundärdatenerhebung im Projektgebiet wurde die Grundlage für eine hydrologische Studie geschaffen, welche mittels Auswertung und Validierung des Datenmaterials verschiedener indonesischer Behörden eine Bewertung möglicher Ursachen des Abflussrückgangs ermöglichte. Insbesondere lag der Fokus auf einer (Trend-) Analyse der Niederschlagsvariabilität sowie dem Kalkabbau im Einzugsgebiet des Flusses. (Oberle, 2011)

Mittels Zeitreihenanalysen des Datenmaterials ausgewählter Niederschlagsstationen aus den Jahren 1952 bis 2009 wurde ein Korrelationskoeffizient zwischen den Niederschlägen in der Trockenzeit und dem für die Region klimabestimmenden *El-Niño-Southern-Oscillation*-Phänomen (ENSO) von $R = -0,57$ (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,3236$) ermittelt, wodurch der bekannte, negative lineare Zusammenhang für die Region nachgewiesen werden konnte (siehe Abbildung 2.15). Als Indikator für die Niederschlagsvariabilität dient hierbei die *Sea-Surface-Temperature*-Anomalie (SST). Jahre mit positiver SST-Anomalie (*El-Niño*-Jahre) sind geprägt durch relativ geringe (siehe Abbildung 2.16), Jahre mit negativer SST-Anomalie (*La-Niña*-Jahre) durch überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen. Im untersuchten Zeitraum wurden sowohl eine Verschiebung der Niederschläge hin zur Regenzeit als auch ein Rückgang der jährlichen Gesamtniederschlagsmengen festgestellt (siehe Abbildung 2.16). Zudem ist ab 2002 ein signifikanter Einbruch der jährlichen Niederschläge erkennbar, welcher zeitlich exakt mit dem beobachteten Rückgang der Abflussmengen korreliert. Qualitativ bestätigt wurde dieser Zusammenhang durch den Anstieg der Niederschlags- und Abflussmengen ab 2010 auf das für den Zeitraum vor 2002 ermittelte Niveau. (Oberle, 2011)

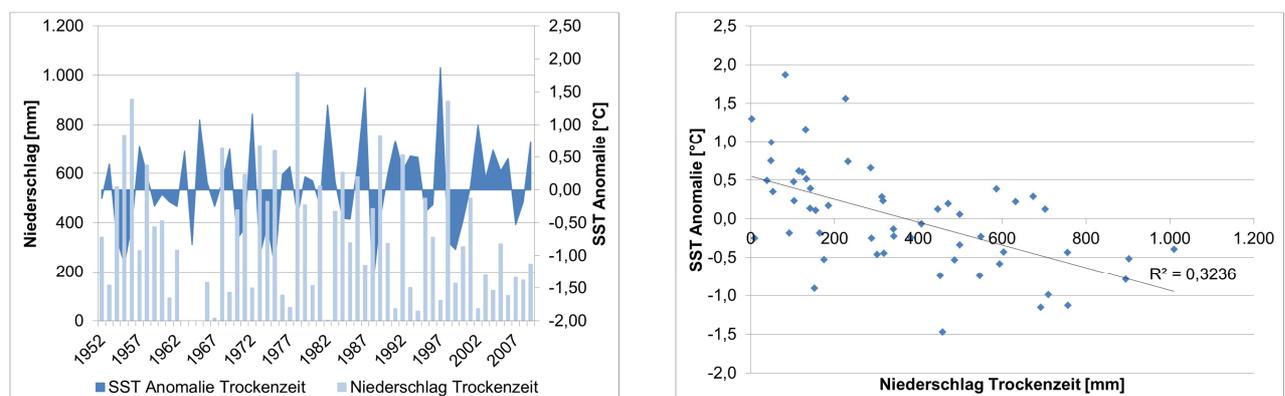


Abbildung 2.15: Betrachtung der Trockenzeit: SST und Niederschlagsmengen *Gunung Kiduls* (links), negative lineare Korrelation zwischen SST-Anomalie und Niederschlägen (1952 bis 2009), beide verändert nach Brunsch et al. (2011)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Die Untersuchungen des Datenmaterials im Hinblick auf den Kalkabbau im Einzugsgebiet des Flusses *Bribin* ergaben ein im Vergleich zum Gesamtvolumen des Karstaquifers sehr geringes Abbauvolumen. Darüber hinaus wurden auch in unmittelbarer Nähe der Abbaugebiete keine Hinweise auf eine Beeinflussung der Fließcharakteristik des unterirdischen Flusses durch lokale morphologische Veränderungen festgestellt. Wenngleich für den derzeitigen Zustand der Einfluss des Kalkabbaus auf die Abflusscharakteristik als vernachlässigbar angenommen wird, so besteht künftig ein nicht unerhebliches Risiko einer Beeinflussung der Fließcharakteristik durch die Abbauaktivitäten. (Oberle, 2011)

Anhand weiterer Studien (bspw. Adji, 2010) konnte gezeigt werden, dass die Zeitspanne von Regenereignissen zu Höchstwasserständen bzw. Basisabflüssen in den Höhlensystemen sowie das Verhältnis von Basisabfluss zu Direktabfluss aufgrund der Heterogenität des Karstgesteins räumlich sehr verschiedenartig sein können (siehe Kapitel 2.6.5.3). Demzufolge kann das Verhältnis von Direktabfluss zu Basisabfluss durch lokale Veränderungen der morphologischen Gegebenheiten wie z.B. bei Ponoren (Schlucklöchern) verändert werden. In Bezug auf den Betrieb der Wasserförderanlage *Bribin* wird davon ausgegangen, dass es sich beim Rückgang der Abflussmengen um einen temporären Zustand in Verbindung mit einer lang anhaltenden, extrem niederschlagsarmen Periode handelte. (Oberle, 2011)

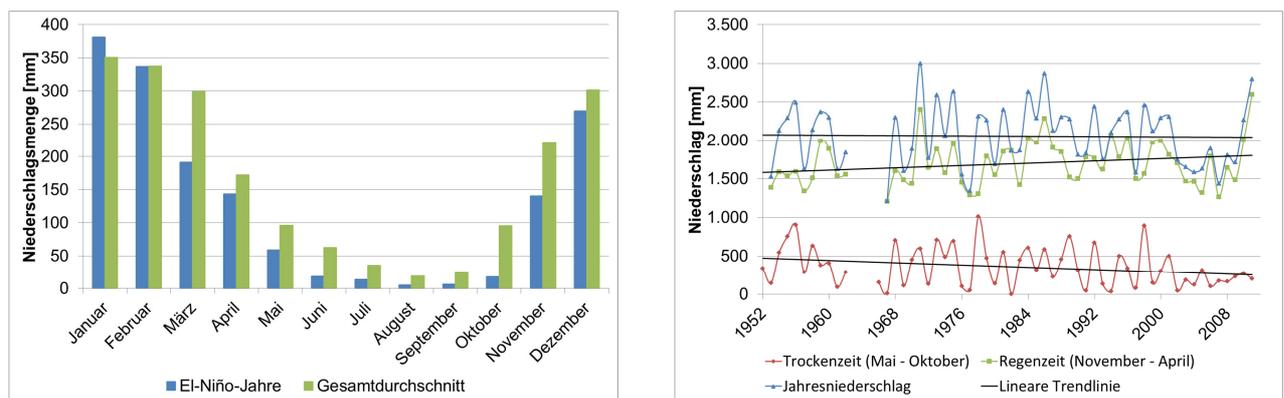


Abbildung 2.16: Mittlere Monatsniederschläge der Jahre 1952 bis 2009 sowie der 11 *El-Niño*-Jahre aus diesem Zeitraum (links), Trendanalyse der Jahresniederschläge *Gunung Kiduls* sowie der Niederschlagsmengen in Regen- und Trockenzeit auf Basis der Zeitreihe 1952 bis 2011 (rechts), beide verändert nach Brunsh et al. (2011)



Abbildung 2.17: Kalkabbau in *Gunung Sewu* mit möglichen Auswirkungen auf die Fließcharakteristik der Karstflüsse (links), bspw. durch Veränderungen der morphologischen Gegebenheiten in der Nähe von Ponoren (rechts)

Niederschlags-Abfluss-Korrelation

Um die hydrologischen Untersuchungen weiter ergänzen zu können, wurde daher das aus dem Vorgängerprojekt bestehende, nur noch eingeschränkt funktionstüchtige *Monitoring*-Netzwerk Anfang 2012 durch sechs Niederschlags- und zwei Klimastationen ersetzt. Die durch das Messsystem gewonnenen Datenbestände ermöglichen weiterführende Analysen der Niederschlagsmengen sowie deren Verteilung im Einzugsgebiet *Bribin*. Anhand dieser Resultate konnte gezeigt werden, dass die lokalen Niederschläge die maßgebende Einflussgröße für die Abflussvariabilität der Karstflüsse darstellen. Im Hinblick auf die Sicherstellung des Dauerbetriebs der Förderanlage *Bribin* lag der Fokus bei der Datenanalyse demzufolge auf der Niederschlags-Abfluss-Korrelation. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 2.18 exemplarisch die aufgezeichneten Niederschlagsmengen der oberstrom gelegenen Stationen *Gombong* und *Tambakromo* sowie die Ganglinie des Flusses *Bribin* für den Monat Februar 2012. Die Station in *Tambakromo* repräsentiert den nördlichsten Teil des Einzugsgebiets und ist von allen Messpunkten am weitesten vom Standort der Förderanlage *Bribin* entfernt. *Gombong* weist hingegen den kürzesten Abstand vom Anlagenstandort auf.

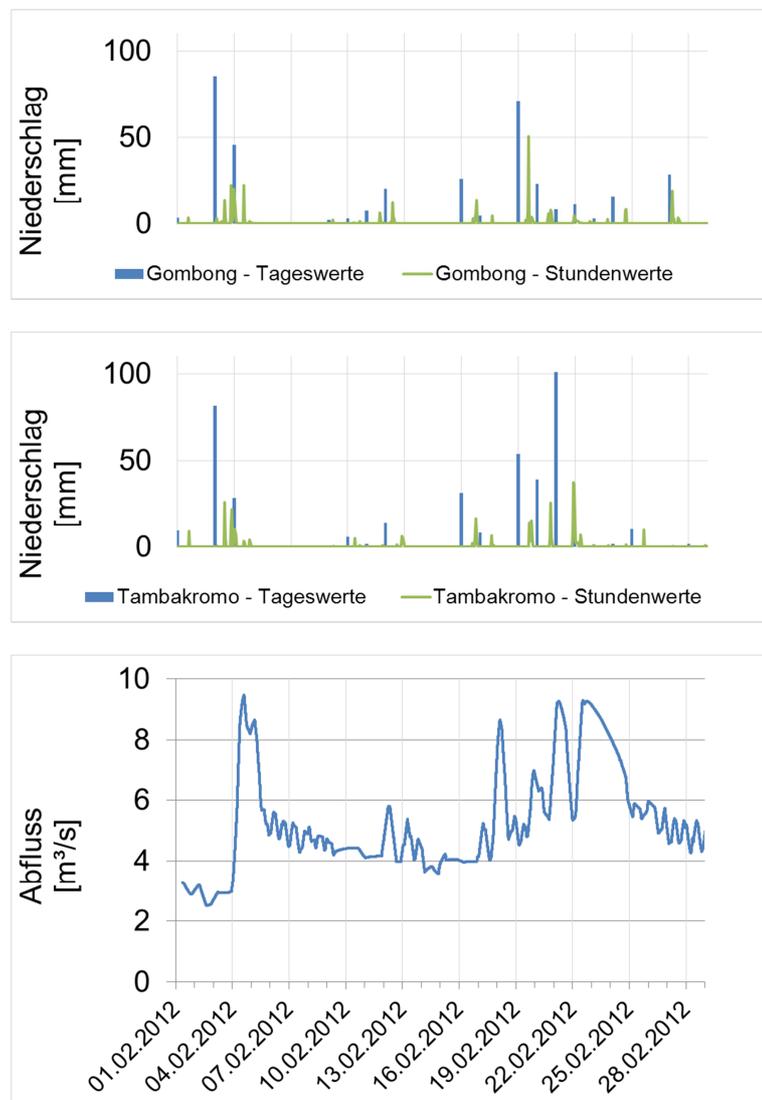


Abbildung 2.18: Exemplarische Analyse der Zeitreihen des hydrologischen Messsystems (oben und Mitte) sowie des *Monitoring*-Systems der Anlage *Bribin* (unten, siehe Kapitel 4.3.3) vom Februar 2012

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

Aufgrund der zeitlichen Einordnung in die jährliche Hauptregenzeit wurde zu Beginn der dargestellten Zeitreihe erwartungsgemäß ein vergleichsweise hoher Basisabfluss von zunächst ca. 3 m³/s ermittelt. Starkniederschlagsereignisse am 03.02.12 (Tageswerte in *Gombong* 85 mm, in *Tambakromo* 82 mm) und 04.02.12 (Tageswerte in *Gombong* 46 mm, in *Tambakromo* 29 mm) führten jedoch mit einer zeitlichen Verzögerung von wenigen Stunden zu hohen Abflussgradienten in Verbindung mit Spitzenwerten von bis zu 9,5 m³/s.

Nach dem Ende eines Niederschlagsereignisses folgt auch der Abflussrückgang mit geringer zeitlicher Verzögerung und hohen Gradienten. Der sich im Anschluss ergebende Basisabfluss nimmt aufgrund der in Kapitel 2.6.5.3 beschriebenen authigenen Filtration (Sickerung) der Niederschlagsmengen jedoch zunächst einen höheren Wert an als zuvor und fällt über einen Zeitraum von ca. 11 Tagen von ca. 5,5 auf 4 m³/s (die in diesem Zeitraum auftretenden Schwankungen, bedingt durch weitere geringere Niederschlagsereignisse, sind bei dieser Beschreibung vernachlässigt). Durch diesen Rückgang über mehrere Tage wird das sukzessive Entwässern des Karstaquifers veranschaulicht.

Bei weiteren Starkniederschlagsereignissen im dargestellten Zeitraum sowie in nachfolgenden Monaten bzw. Regenzeiten konnten vergleichbare Abläufe nachgewiesen werden. Hierdurch wird ersichtlich, dass die Abflussbedingungen der unterirdischen Flusssysteme insbesondere in der Regenzeit einer enormen Dynamik unterworfen sind, woraus sich hohe Anforderungen an technologisch-konzeptionelle Ansätze zur Nutzbarmachung von Karstwasserressourcen ergeben.

2.6.5.3 Geologie und Hydrogeologie

Nahe der Südküste *Javas* befindet sich eine aktive Subduktionszone, an der die Indio-Australische Platte unter die Eurasische Platte abtaucht. Seit dem Zeitalter des Tertiärs bis zur Gegenwart sind stark ausgeprägter Vulkanismus sowie Deformationen geologischer Strukturen allgegenwärtig. Wie zuvor beschrieben lässt sich die Region *Gunung Kidul* in vier geologische Bereiche untergliedern (siehe Abbildung 2.12): Das *Baturagung*-Massiv im Norden, südlich angrenzend das *Wonosari*-Plateau, das im Osten gelegene *Panggun*-Massiv sowie die an den Indischen Ozean angrenzende Karstregion *Gunung Sewu*. (Lehmann, 1936)

Mit Höhen von über 800 m über NN ist das *Baturagung*-Massiv im Norden die höchste Bergkette *Gunung Kiduls* und besteht aus vulkanischen Ablagerungen (MacDonald & Partners, 1984). Die Oberfläche des *Wonosari*-Plateaus ist eben mit geodätischen Höhen bis zu 200 m. Sie besteht, ebenso wie das Karstgebiet *Gunung Sewu*, aus Kalkstein, sogenannten *Wonosari*-Schichten, mit Mächtigkeiten von bis zu 650 m (Haryono und Day, 2004).

Im Osten an das *Wonosari*-Plateau angrenzend befindet sich ein mächtiger Querrücken aus tertiären vulkanischen Ablagerungen, welcher in der *Gunung Panggun* knapp 800 m erreicht und im Süden von der Region *Gunung Sewu* begrenzt wird. Das Karstgebiet *Gunung Sewu* nimmt bei einer Länge von 85 km und einer Breite von 10 bis 25 km eine Fläche von etwa 1.400 km² ein (Lehmann, 1936). Über den Kalkschichten der *Wonosari*-Formation ist der Bodentyp „*Terra Rossa*“ (Böden aus Kalksteinrotlehm) weit verbreitet. In Senken können diese Böden eine Mächtigkeit bis zu 30 m erreichen. Weitere Schichten in *Gunung Kidul* sind vulkanische Tuffe, Sandablagerungen in Mündungsgebieten und Buchten des Indischen Ozeans sowie Gehängeschutt an steilen Einschnitten und im Küstenbereich (Flathe und Pfeiffer, 1965). Durch Hebung und Faltung der Riffkalke wurden das *Wonosari*-Plateau und die *Gunung Sewu* zu ihrer gegenwärtigen morphologischen Beschaffenheit geformt (MacDonald & Partners, 1984). Seitdem sind die Kalksteine der Verwitterung ausgesetzt.

Im Laufe der Zeit haben sich in *Gunung Sewu* durch intensive Verwitterung des Kalksteins in Verbindung mit hohen Niederschlägen, Temperaturen und CO₂-Umsetzung im Boden charakteristische Karstformen ausgebildet: Ponore, Karren, ausgeprägte Höhlensysteme im Karbonatgestein und die Kegelkarste. Letztere sind namensgebend für die Karstlandschaft *Gunung Sewu*, was in der Landessprache „Land der tausend Hügel“ bedeutet.

„Die Hügel der *Gunung Sewu* sind auffällig gerundete Kuppen, deren relative Höhe, vom tiefsten Punkt der benachbarten Hohlform gerechnet, selten 75 Meter übersteigt. Sie stehen sehr dicht beieinander, so dass durchschnittlich 30 Kuppen auf den Quadratkilometer kommen“ (Lehmann, 1936). Die Hohlformen zwischen den Kuppen sind durch ihren undurchlässigen Tonboden oft zu kleinen Seen aufgestaut. Diese flachen, mit Wasser gefüllten Karstwannen werden von den Einwohnern *Gunung Sewus* als „*Telaga*“ bezeichnet. Abbildung 2.19 zeigt exemplarisch den Oberflächencharakter dieser Karstlandschaft sowie einen ausgetrockneten Karstwannensee in der Trockenzeit.



Abbildung 2.19: *Gunung Sewu* in der Regenzeit (links), ausgetrockneter „*Telaga*“ in der Trockenzeit¹⁴ (rechts)

Gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.3.3 unterscheiden sich Karstaquifere von anderen Aquiferen insbesondere durch ihre Komplexität und Heterogenität. Aufgrund der durch die Verwitterungsprozesse entstandenen unterirdischen Höhlensysteme, in denen das Wasser abfließt, ist jeder Karstaquifer einzigartig. (White, 1988)

So auch das Gebiet *Gunung Sewu*, welches aufgrund von Korrosions- und Erosionsprozessen über Jahrtausende von unzähligen miteinander vernetzten Höhlen durchzogen ist. Daraus resultiert der komplette Austausch jeglichen Oberflächenabflusses durch ein weit verzweigtes Abflusssystem im Untergrund. Das Wasser dieser unterirdischen Flüsse tritt fast vollständig erst wieder in Quellen an der Küste zutage. Einer der wesentlichen Auslässe an der Südküste ist *Sumber Baron*. Die Tiefen der Grundwasserlagen *Gunung Kiduls* variieren örtlich stark. Im *Wonosari*-Plateau werden ein in etwa parallel zur Oberfläche verlaufender Grundwasserspiegel sowie Tiefen bis zu 50 m, in der *Gunung Sewu* teils deutlich über 50 m angenommen (abgesehen von küstennahen Bereichen). (Lehmann, 1936)

Abbildung 2.20 zeigt einen schematischen Schnitt durch den Karstaquifer der *Gunung Sewu* mit Darstellung der wesentlichen hydrogeologischen Merkmale. Hierbei wird nach dem Ursprung des Wassers und nach den Mechanismen der Speisung unterschieden. Authigenes Wasser ergibt sich aus Niederschlägen innerhalb der *Gunung Sewu*, allogenes Wasser entstammt dem Zufluss von außerhalb der Region. Das Wasser aus beiden Quellen kann entweder in großen Mengen

¹⁴ Abbildung des Instituts für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

punktuell (Schwinden, Schächte) oder über viele kleine Wege (Sickerung) in den Untergrund gelangen. Diese Unterscheidung ist im Hinblick auf die Wasserqualität sowie die Geschwindigkeit und Menge des abfließenden Wassers von großer Bedeutung. Schächte und Schwinden entstehen meist am tiefsten Ende der Trockentäler, die einen großen Teil des Gebietes durchschneiden. Häufig bilden diese Schwinden den Zugang zu einem steilen Schacht (indonesisch: *Luwang*), der u.U. zu einem flachen Höhlengerinne (indonesisch: *Gua*) führt. (MacDonald & Partners, 1984)

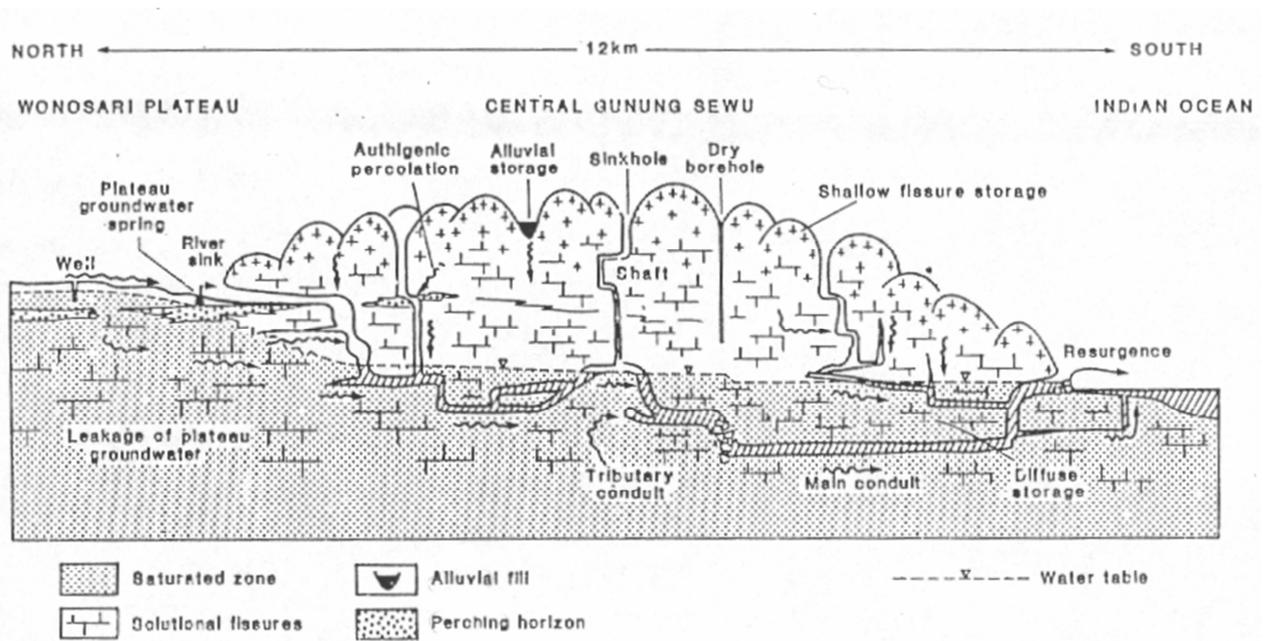


Abbildung 2.20: Karsthydrologie der *Gunung Sewu* (MacDonald & Partners, 1984)

Zu vielen Höhlen der *Gunung Sewu* ist der Zugang über Flussschwinden oder Karstschächte möglich. Die Querschnittsfläche der Gänge kann dabei stark variieren. Der Grundwasserfluss durch die Höhlen verläuft meist mit geringem Gefälle gleichmäßig über einige hundert Meter bis hin zu mehreren Kilometern. Andere Höhlenverläufe sind komplex und treppenförmig; auf manchen Streckenabschnitten herrscht Druckabfluss. Bei der Begehung ist zu beachten, dass die Grundwasserbedingungen sich das Jahr hindurch erheblich verändern, d.h. in vielen Höhlenverläufen, in denen während der Trockenzeit kaum oder kein Wasser fließt, können sich in der Regenzeit Sturzbäche von mehreren Kubikmetern pro Sekunde bilden. (MacDonald & Partners, 1984)

Der dritte Hauptweg des Wassers durch die ungesättigte Zone des Karstaquifers ist die authigene Filtration (Sickerung). Anders als die zuvor beschriebenen Wege, die hauptsächlich auf Abfluss in Kanälen konzentriert sind, sickert die authigene Filtration über das Einzugsgebiet verteilt ein. Ein großer Anteil wird dabei mit einer Geschwindigkeit von mehreren hundert Metern pro Tag durch die vertikalen Klüfte geleitet; ein Teil davon wird in den Feinklüften zurückgehalten, die sich in den oberen zehn bis fünfzehn Metern des Grundgesteins befinden. Diese Feinklüfte werden langsamer durchlaufen als die Hauptwege und speichern so genügend Wasser, um für mehrere Monate die Sickerung aufrecht zu erhalten. Diese Rückhaltungswirkung führt somit dazu, dass viele der unterirdischen Flüsse trotz sehr geringer Niederschlagsmengen in der Trockenzeit ganzjährig wasserführend sind (siehe Kapitel 2.6.5.2). (MacDonald & Partners, 1984)

2.6.5.4 Stand der Wasserversorgung

Ein ganzjährig verfügbares Wasserdargebot ist im Hinblick auf die Nutzbarmachung der Karstwasserressourcen zur dauerhaften Versorgung der lokalen Bevölkerung *Gunung Sewus* von großer Bedeutung. Diese nachhaltige Förderung der unterirdischen Wasservorkommen war das zentrale Ziel des BMBF-geförderten Vorhabens „Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer, *Yogyakarta Special Province*, Indonesien“, welches als erste Projektphase des IWRM-Vorhabens bezeichnet werden kann (siehe Kapitel 2.6.2).

Hierbei wurde seitens des KIT in Kooperation mit indonesischen Partnern eine unterirdische Wasserförderanlage in der Karsthöhle *Gua Bribin* errichtet, welche mittels eines innovativen wasserkraftbetriebenen Förderkonzepts („Volleinstau mittels Sperrwerk“, siehe Kapitel 2.6.2 und 3.6) die nachhaltige Versorgung von bis zu 80.000 Menschen sicherstellen soll. Im Hinblick auf die im Jahr 2010 im Rahmen einer Volkszählung ermittelte Bevölkerungszahl *Gunung Sewus* von 267.640 Menschen (Badan Pusat Statistik, 2011) wird jedoch ersichtlich, dass durch den kontinuierlichen Betrieb der Wasserförderanlage *Bribin* eine Verbesserung der Versorgungssituation nur für einen Teil der Bevölkerung erreicht werden kann. Des Weiteren ist eine Vervielfältigung des auf dem partiellen Einstau eines Karstfließgewässers basierenden „*Bribin*-Konzeptes“ aufgrund der zuvor geschilderten Charakteristiken von Karstlandschaften nicht an jedem beliebigen Standort möglich.

Vor diesem Hintergrund wurde bereits in den Jahren 2000 bis 2002 durch eine BMBF-geförderte Machbarkeitsstudie des KIT ein ergänzendes Förderkonzept entwickelt, welches statt eines Einstaus mittels Sperrwerk die Integration einer Holzdruckleitung zur Bereitstellung der für den Antrieb des ebenfalls wasserkraftbetriebenen Fördersystems erforderlichen Druckenergie vorsieht. Dieses zweite Konzept eignet sich insbesondere für (ober- und unterirdische) Standorte mit hohem Gefälle (z.B. Wasserfall), wodurch die Länge der Holzrohrleitung zur Bereitstellung des erforderlichen Vordrucks sowie der resultierende technische und wirtschaftliche Aufwand der Gesamtanlage begrenzt werden können.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden zunächst geeignete Bedingungen in der Höhle *Gua Seropan* vorgefunden. Durch die Realisierung einer Pilotanlage sollte auch das zweite Konzept auf seine Praxistauglichkeit hin untersucht werden, sodass künftig umfassende Erfahrungswerte in Bezug auf zwei sich ergänzende Wasserförderkonzepte verfügbar sind. Im Laufe der Projektaktivitäten wurden jedoch im Rahmen weiterführender Untersuchungen in der Höhle *Seropan* neue, zu Beginn noch unbekannt Bedingungen entdeckt, welche dem Bauvorhaben entgegenstanden. Basierend auf einer Risikobewertung durch die deutschen und indonesischen Partner wurde die Rückstellung der Implementierung beschlossen, bis durch weitere Untersuchungen ein umfassendes Bild der lokalen Bedingungen gezeichnet werden kann.

Die Bestrebungen der indonesischen Regierung zur Verbesserung der Wasserversorgung in der Region *Gunung Sewu* reichen Lux (2004) zufolge bis in die 1970er Jahre zurück und können zunächst in drei Phasen unterteilt werden (siehe Abbildung 2.21). Die erste Phase konzentrierte sich auf die Nutzbarmachung der *Telagas* (indonesisch: Karstwannenseen, siehe Kapitel 2.6.5.3). Durch einen geeigneten Ausbau dieser natürlichen, in Tälern mit undurchlässigen Tonböden auftretenden Wasseransammlungen können nahegelegene Siedlungen in Zeiten geringen Niederschlags mit Wasser versorgt werden. Die praxismgerechte Umsetzung dieses Versorgungskonzeptes war aufgrund der geringen Anzahl geeigneter Karstwannenseen sowie aufgrund deren völligen Austrocknung während der Trockenzeit jedoch mit substantiellen Schwierigkeiten verbunden (Uhlig, 1980; Waltham et al., 1985)

2 Hemmnisse und Treiber nachhaltigen Wassermanagements

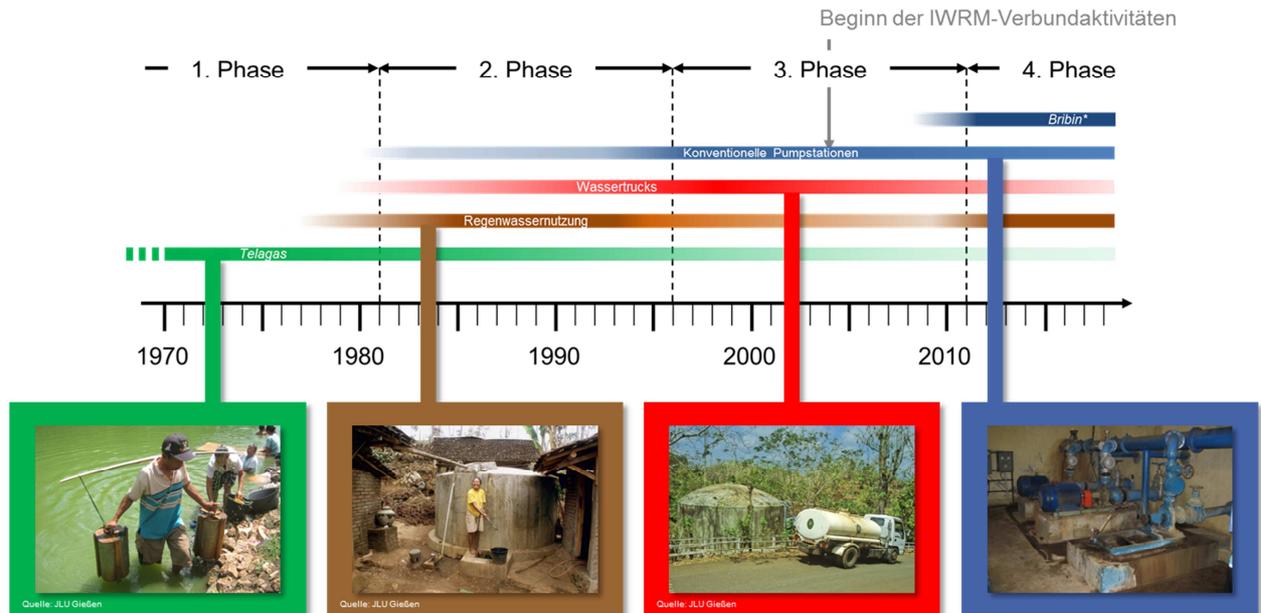


Abbildung 2.21: Entwicklungsstufen der Wasserversorgung in *Gunung Sewu*, verändert nach Dittmann et al. (2011)

In den 1980er Jahren begann die zweite Phase, welche im Rahmen eines UNICEF-geförderten Programms zwei Alternativen zur Wasserförderung beinhaltete. Als erste Alternative wurden Zisternen zur Regenwassernutzung errichtet. Aufgrund der begrenzten Größe der Zisternen von ca. 9 m³ konnte ein im Durchschnitt vierköpfiger Haushalt über die für gewöhnlich sechsmonatige Trockenzeit mit lediglich 12,5 Litern pro Kopf und Tag (englisch: *Liters per capita per day*, lpcd) versorgt werden. Auf diese Weise konnte somit die von Seiten der WHO (2005) empfohlene Mindestversorgung von 20 lpcd zum Schutz vor Krankheit und Mangelerscheinungen nicht bereitgestellt werden. Diese Situation führte zur Etablierung eines neuen Geschäftszweigs, welcher sich auf die Wasserversorgung *Gunung Sewus* mittels Tanklastwagen konzentrierte. Jedoch konnte sich ein Teil der Haushalte eine derartige Wasserversorgung aufgrund der verbundenen hohen Kosten nicht leisten. Auch aus ökologischer Sicht ist diese Form der Wasserversorgung als unzureichend zu bezeichnen. (Dittmann et al., 2011)

Die zweite Alternative, welche seit den 1980er Jahren bis in die Gegenwart Anwendung findet, stellt die Erschließung der unterirdischen Karstwasserressourcen durch konventionelle Pumpstationen dar. So wurden im Rahmen des UNICEF-Hilfsprogramms kleine unterirdische Wehranlagen in mehreren Karsthöhlen errichtet, um zunächst mittels dieselgeneratorbetriebenen Pumpsysteme eine Teilwassermenge in einen höher gelegenen Verteilspeicher zu fördern. In den 2000er Jahren wurde die Energieversorgung aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung der Region auf Stromnetzbetrieb umgerüstet. Jedoch sind sowohl dieselgenerator- als auch netzstrombetriebene Pumpsysteme mit substantiellen Nachteilen verbunden, da unvermeidbare hohe Förderkosten aufgrund des Treibstoff- oder Strombedarfs entstehen (siehe Kapitel 4.11) und ein erhöhtes Risiko von Umweltverschmutzungen durch den Austritt von Treibstoffen gegeben ist. Die Nachhaltigkeit dieser Lösung war somit weder aus wirtschaftlicher noch aus ökologischer Sicht gegeben. (Dittmann et al., 2011)

Mitte der 1990er Jahre begann die indonesische Regierung trotz mangelnder Nachhaltigkeit dieser Förderkonzepte in einem Großteil der Region *Gunung Sewu* mit dem Ausbau von Versorgungsnetzen für beide Förderstationen. Lux (2004) zufolge repräsentiert dies die dritte

Phase zur Implementierung einer Wasserversorgung in der Karstregion. Jedoch konnte mit den bis zu diesem Zeitpunkt implementierten Technologien noch immer keine ausreichende Wassermenge für die Versorgung aller Einwohner zur Verfügung gestellt werden.

Vor diesem Hintergrund ist eine der wesentlichen, im Rahmen der F&E-Aktivitäten des IWRM-Verbundes geleisteten Errungenschaften der Beitrag zur Etablierung einer vierten Phase zur nachhaltigen Wasserversorgung in *Gunung Sewu* (siehe Abbildung 2.21). Diese Phase stützt sich auf die Errichtung eines hochangepassten da wasserkraftbetriebenen Wasserfördersystems in der Höhle *Gua Bribin*. Zusätzlich erfolgte im Rahmen der Verbundaktivitäten eine partielle Rehabilitierung und Optimierung des Verteilnetzes sowie die exemplarische Implementierung von Aufbereitungsanlagen für das geförderte Höhlenwasser und die entstehenden Abwässer.

Zur Analyse der in der Anlage *Bribin* eingesetzten Fördertechnologie sowie zur Bewertung des Anwendungspotentials folgt im anschließenden Kapitel auf Basis der Grundlagen hydraulischer Strömungsmaschinen eine detaillierte technische Beschreibung der Gesamtanlage sowie des Wasserfördersystems. Zudem wird ein technischer Vergleich mit konventionellen Fördersystemen dargelegt, um die Vorteile des „*Bribin*-Systems“ aufzeigen zu können.

3 Wasserförderung: Historische, aktuelle und innovative Ansätze

Laut DVGW (2005) (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) sind die Aufgaben deutscher Trinkwasserversorger wie folgt beschrieben: *„Ein Trinkwasserversorger muss im Rahmen seiner Aufgaben [...] über eine personelle, technische, wirtschaftliche und finanzielle Ausstattung sowie eine Organisation verfügen, die eine sichere, zuverlässige sowie nachhaltige (wirtschaftlich, sozial- und umweltverträglich) Versorgung mit qualitativ einwandfreiem Trinkwasser gewährleistet. [...]. Trinkwasserversorger haben die Aufgabe, den Kunden Trinkwasser jederzeit in einwandfreier Qualität, ausreichender Menge und unter dem Versorgungsdruck bereitzustellen, der für eine einwandfreie Deckung des üblichen Bedarfs im Versorgungsgebiet erforderlich ist“*. Diese Beschreibung lässt erahnen, dass eine nachhaltige Wasserversorgung mit erheblichem technischem, ökonomischem, personellem und betrieblichem Aufwand einhergeht.

Grundsätzlich erfordert der Transport einer bestimmten Wassermenge von der Entnahmestelle zum Verbraucher die Bereitstellung geeigneter Maschinen sowie ausreichender Antriebsenergie. Der mittlere spezifische Energiebedarf in der Wasserversorgung liegt selbst in einem technisch fortschrittlichen Land wie Deutschland trotz des flächendeckenden Einsatzes energieeffizienter Technologien bei 0,6 kWh/m³. In Regionen mit anspruchsvollen naturräumlichen Bedingungen (z.B. tiefe Lage der Grundwasservorkommen) bzw. bei Verwendung veralteter oder ineffizienter Technologien kann dieser Wert deutlich höher liegen. Den Großteil der Energie verbrauchen die zur Wasserentnahme bzw. zur Wasserförderung eingesetzten (Hochdruck-) Förderpumpen. Demzufolge kommt im Hinblick auf die Gewährleistung eines aus technischer, ökonomischer, betrieblicher und ökologischer Sicht sinnvollen Förderbetriebs der Wahl der Pumpen sowie der Art der Energieversorgung eine große Bedeutung zu. (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011)

Generell gilt es bei der Auslegung eines Pumpsystems zur Wasserförderung einen Kompromiss zwischen der technischen Möglichkeit, mithilfe einer Pumpe eine bestimmte Anlagenförderhöhe überwinden zu können, und der möglichst kostengünstigen und effizienten Konstruktion des Gesamtsystems zu finden (Karger und Hoffmann, 2013). Dabei ist neben den rein technischen und betriebswirtschaftlichen Bedingungen die Handhabbarkeit durch lokales Personal ein weiterer Aspekt, den es insbesondere bei der Anlagenplanung in strukturschwachen bzw. entlegenen Regionen zu berücksichtigen gilt. In diesen Regionen ist beim Einsatz anfälliger und wartungsaufwändiger Fördersysteme ein erhöhtes Risiko gegeben, dass es zu Ausfällen und langanhaltenden Standzeiten oder gar zu einem Versagen des Gesamtsystems kommt.

Weiterhin ist im Hinblick auf die stetig steigenden Energiepreise und das wachsende Bewusstsein in Bevölkerung, Politik und Industrie für die Notwendigkeit des Einsatzes ökologisch verträglicher und nachhaltiger Technologien auch in der Wasserversorgung eine energieeffiziente und wirtschaftliche Auslegung eines Wasserfördersystems von zentraler Bedeutung – dies gilt für Neubau- sowie für Sanierungsprojekte gleichermaßen (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). In Schwellen- und Entwicklungsländern gilt diese Aussage mit Einschränkung, da hier häufig die reine Funktionserfüllung und weniger nachhaltigkeitsbezogene Aspekte im Vordergrund stehen.

3.1 Historische Wasserfördersysteme

Der Wasserbedarf ist eine regionalspezifische Größe und täglichen sowie jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, welche durch den so genannten Tages- bzw. Jahreslastgang beschrieben werden. In der Geschichte wurde eine Vielzahl von Technologien für die Wasserförderung eingesetzt, welche in der jeweiligen Epoche dem Stand der Technik entsprachen und sich über teils lange Zeiträume in der Praxis bewährt haben. Einige Technologien (bspw. archimedische Schraube) sind aufgrund ihrer Funktionsweise in Bezug auf die überwindbare Förderhöhe H_P sowie die realisierbare Fördermenge Q_P als maßgebliche Kenngrößen eines Wasserfördersystems limitiert. (Wembacher, 2013)

Hingegen zeichnen sich sogenannte „Hydraulische Widder“ noch heute durch ein hohes Anwendungspotential insbesondere für den dezentralen Einsatz in entlegenen (Gebirgs-) Regionen aus. Sie werden seit dem 18. Jahrhundert zur landwirtschaftlichen Nutzung sowie zur Versorgung von Weilern, Einöden und Berghütten eingesetzt. Hydraulische Widder nehmen eine Sonderstellung unter den Wasserfördersystemen ein, da sie gleichwohl als Wasserkraftmaschine als auch zur Wasserförderung dienen. Diese zur Gruppe der Verdrängerpumpen gehörende Technologie kann auch als stromlose Wasserhebevorrichtung beschrieben werden, da ihr Betrieb keine Fremdenergeträger sondern lediglich eine ausreichend hohe Wassermenge und ein geeignetes Gefälle erfordert. Durch Wandlung der kinetischen Energie des Triebwassers in potentielle Energie kann ein Teil der Gesamtwassermenge auf ein höheres geodätisches Niveau bzw. auf eine bestimmte Förderhöhe gefördert werden. (Mutschmann und Stimmelmayr, 2011)



Abbildung 3.1: Hydraulischer Widder in der „Ladephase“¹⁵ (links) und beim Ausstoßen des Triebwassers¹⁶ (rechts)

Das einfache mechanische Funktionsprinzip, welches lediglich zwei bewegliche Komponenten beinhaltet (Ventile), zeichnet sich durch hohe Robustheit und nahezu verschleißfreien Betrieb aus, wonach hydraulische Widder über Jahre hinweg ohne menschliches Zutun betrieben werden können (Wembacher, 2013). Demzufolge ist der Betrieb mit einem vergleichsweise geringen technischen und finanziellen Wartungsaufwand verbunden. Der robuste und autonome Betrieb kann sich jedoch im Falle erforderlicher Instandsetzungsarbeiten auch als Nachteil erweisen, da dem für diese Instandsetzung zuständigen Personal womöglich der Umgang mit dieser Technologie aufgrund fehlender routinierter Arbeitsvorgänge nur unzureichend vertraut ist.

¹⁵ http://www.radiomuseum.org/museum/d/hydraulischer-widder-zschetzsch/images/hydraulischer_widder_zschetzsch_130623_04.jpg (12.05.2016)

¹⁶ http://www.radiomuseum.org/museum/d/hydraulischer-widder-zschetzsch/images/hydraulischer_widder_zschetzsch_130623_01.jpg (12.05.2016)

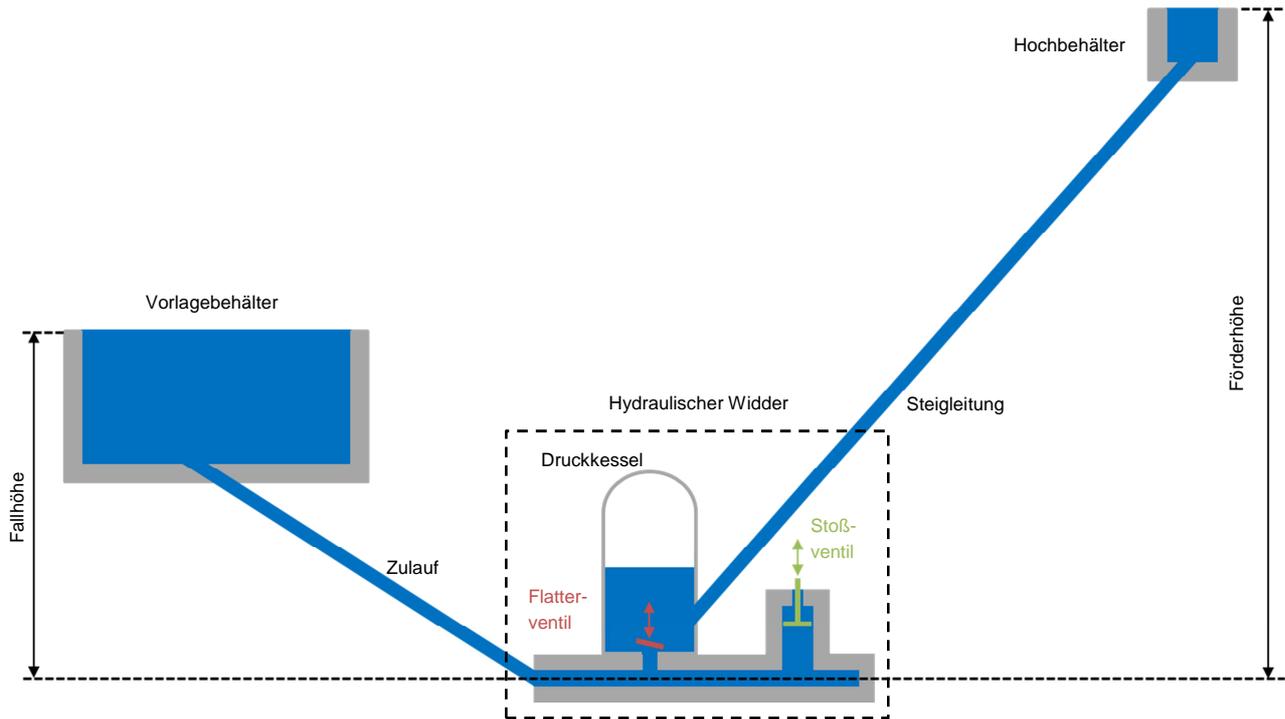


Abbildung 3.2: Funktionsschema eines hydraulischen Widders

Durch die direkte Energieübertragung von einer aus geringer Fallhöhe H_T entnommenen großen Wassermenge Q_T auf eine auf große Höhe H_P geförderte kleine Wassermenge Q_P sind dieser Technologie theoretisch keine Grenzen für den Einsatz gesetzt. Aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ergeben sich in der Praxis jedoch folgende Beschränkungen: Bei Standardmaschinen können Fallhöhen von 0,5 m bis 35 m sowie ein Verhältnis von Förderhöhe zu Fallhöhe von 2:1 bis 15:1 verarbeitet werden (Schlumpf, 2012). Einzelne Hersteller bieten Sonderlösungen an für Fallhöhen von über 100 m sowie Förderhöhen von bis zu 500 m (Schlumpf, 2012). Fördermengen liegen bei Standardmaschinen zwischen $0,5 \text{ l min}^{-1}$ und 150 l min^{-1} ; auch hier können mittels Sonderanfertigungen höhere Werte umgesetzt werden. Der Wirkungsgrad dieser Technologie ist stark von den lokalen Gegebenheiten abhängig und liegt zwischen 25 % und 80 %. Im Optimalfall sind bis zu 92 % möglich (Schneider, 2011).

Durch die Anforderungen bzgl. eines geeigneten Verhältnisses von Förder- zu Fallhöhe sowie durch die konstruktive Begrenzung der realisierbaren Fördermenge können die technischen Grenzen dieser Maschinen enger gesteckt sein als bei alternativen Wasserfördersystemen. Zur Realisierung einer größeren Fördermenge sowie zur Bewirtschaftung eines schwankenden Abflusssdargebots kann daher – ähnlich zur Wasserförderanlage *Bribin* (siehe Kapitel 4.1) – der Einsatz mehrerer Maschinen im Parallelbetrieb sinnvoll sein. Im Hinblick auf die technischen sowie die ökonomischen Rahmenbedingungen kann dies jedoch nicht verallgemeinert werden.

3.2 Hauptpumpenbauarten in der Wasserförderung

Grundsätzlich kann jede Pumpenart, die sich zur Flüssigkeitsförderung eignet, in der Wasserversorgung eingesetzt werden. Pumpen sind Strömungsarbeitsmaschinen und dienen dem Zweck, einem Fluid Druck- und Geschwindigkeitsenergie zuzuführen. Hierzu wird der Welle, auf der das Laufrad der Pumpe installiert ist, mechanische Energie bzw. ein Drehmoment durch

3 Wasserförderung: Historische, aktuelle und innovative Ansätze

ein Antriebsaggregat zugeführt. Heutzutage sind Verdrängerpumpen (z.B. Hub- und Kreiselpumpen, Membranpumpen, usw.) und Kreiselpumpen (insbesondere Radialpumpen) aufgrund ihrer langjährigen Bewährung in der Praxis weltweit die am häufigsten eingesetzten Pumpenarten im Wassersektor. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Bei Kolbenpumpen wird ein Kolben innerhalb des Pumpengehäuses hin und her bewegt und verändert dadurch die Größe des sogenannten Kompressionsraums. Die Rotationsbewegung ergibt sich durch einen Pleuelantrieb über eine Pleuelwelle, welcher durch einen Elektro- oder Verbrennungsmotor angetrieben wird. Wird das Volumen dieses Kompressionsraums vergrößert, so entsteht ein Unterdruck und das Fördermedium kann durch das Saugventil eindringen. Bei Verkleinerung des Kompressionsraums wird ein Überdruck erzeugt und das Fördermedium wird bei Überschreitung eines Grenzwertes durch das Druckventil in die Druck- bzw. Förderleitung ausgestoßen (siehe Abbildung 3.3). Bei konstanten Betriebsbedingungen ist die Fördermenge einer Kolbenpumpe kaum veränderlich, wodurch sie sich insbesondere für die Förderung kleiner Ströme bei großer Förderhöhe sowie als Dosierpumpe eignet. (Karger und Hoffmann, 2013)

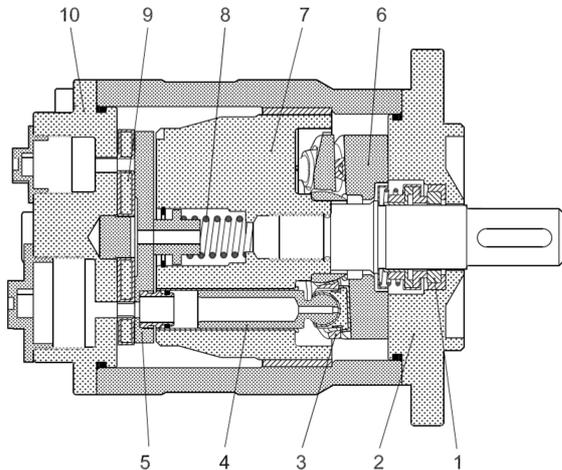


Abbildung 3.3: Schnittbild Hubkolbenpumpe¹⁷ (links; 1 Wellendichtung, 2 Flansch, 3 Haltering, 4 Kolben, 5 Ventilteller, 6 Schwenkscheibe, 7 Zylindermantel, 8 Feder, 9 Endplatte, 10 Anschlussflansch), Hubkolbenpumpe Typ PAH 4 Hersteller Danfoss A/S¹⁸ (rechts)

Kreiselpumpen (siehe Abbildung 3.4) übertragen mithilfe eines oder mehrerer beschauelter Laufräder mechanische Energie auf das Fördermedium, welches dem Laufrad axial zuströmt. Durch Übertragung von Fliehkräften erfährt das Fördermedium eine Beschleunigung am Laufrad von innen nach außen. Dies führt zur Entstehung einer Geschwindigkeitskomponente in Umfangsrichtung, welche durch die anschließende Umlenkung im Spiralgehäuse durch Querschnittsvergrößerung – bzw. durch feststehende Leiträder bei mehrstufigen Pumpen – in Druckenergie umgewandelt wird. Dabei korreliert der Druckanstieg mit dem Laufraddurchmesser und der Drehzahl. Im Vergleich zu Verdrängerpumpen zeichnen sich Kreiselpumpen durch Vorteile wie bspw. pulsationsfreie Förderung, hohe Zuverlässigkeit aufgrund des Verzichts auf oszillierende Bauteile, Betrieb mit hohen Drehzahlen sowie hohe Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Betriebsbedingungen aus. Nachteilig ist der vergleichsweise niedrige Wirkungsgrad bei geringen Förderströmen in Verbindung mit großen Förderhöhen sowie, dass Kreiselpumpen i.d.R. nicht selbstansaugend sind. (Bohl und Elmendorf, 2004)

¹⁷ <http://high-pressurepumps.danfoss.com/products/high-pressure-pumps/> (16.12.2015)

¹⁸ https://www.cmttechnik.se/p/productgroup/3277/p_1121/original.jpg (16.12.2015)

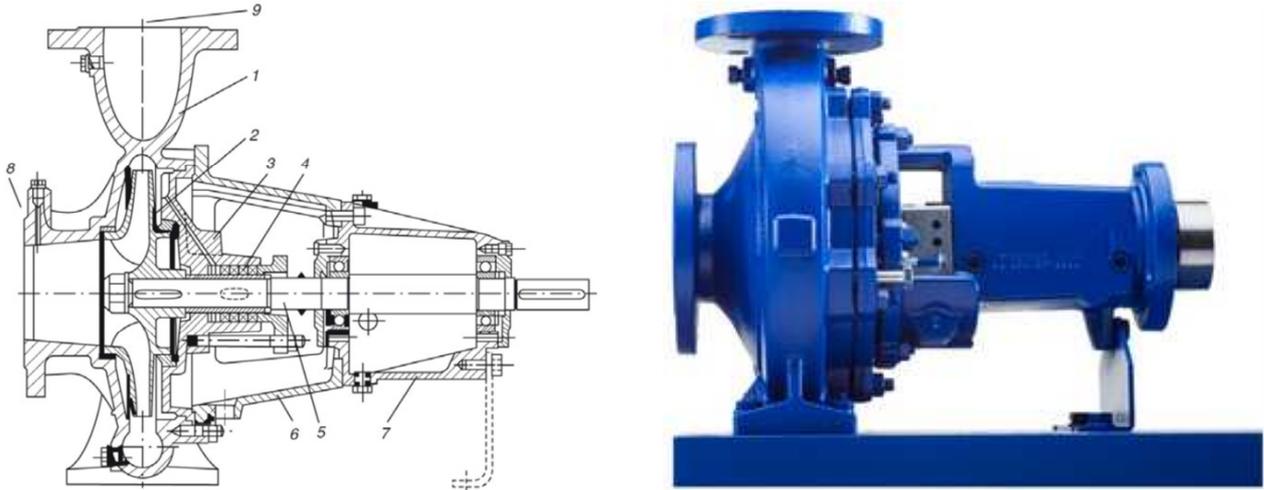


Abbildung 3.4: Schnittbild Kreiselpumpe (links; 1 Gehäuse, 2 Laufrad, 3 Druckdeckel, 4 Wellendichtung, 5 Welle, 6 Zwischenstück, 7 Lagerträger, 8 Saugstutzen, 9 Druckstutzen) (Karger und Hoffmann, 2013), Kreiselpumpe ETANORM Hersteller KSB AG ¹⁹ (rechts)

Anhand ihrer Laufradform können Kreiselpumpen in eine Vielzahl von Bauarten untergliedert werden. Beispiele hierfür sind Radialräder, Halbaxial- bzw. Diagonalräder und Axialräder (siehe Abbildung 3.5). Zur Auswahl einer geeigneten Pumpenbauart für einen konkreten Anwendungsfall werden zunächst Kenntnisse bzgl. der gewünschten Fördermenge und der erforderlichen Förderhöhe benötigt. Mithilfe dieser Informationen kann eine Vorauswahl getroffen werden, wonach durch Variation der Drehzahl der optimale Wirkungsgrad ermittelt werden kann. Bei Bestätigung der Vorauswahl ist somit unmittelbar die Laufradform festgelegt. In Abbildung 3.5 sind neben verschiedenen Laufradformen auch die zugehörigen spezifischen Drehzahlen n_q dargestellt (siehe Kapitel 3.3.3). (Bohl und Elmendorf, 2004)

Generell ist die durch ein einzelnes Laufrad realisierbare Förderhöhe H_P limitiert und kann nur durch die Aneinanderreihung mehrerer Laufräder erhöht werden – so im Falle von mehrstufigen Pumpen. Auch der Fördermenge Q_P sind technische bzw. konstruktive Grenzen gesetzt, d.h. dieser Wert kann im Falle von Radial- oder Halbaxialrädern bei gleicher Baugröße der Pumpe lediglich durch eine so genannte 2-flutige Ausführung erhöht werden. Im letztgenannten Falle wird das Fördermedium durch zwei spiegelbildlich angeordnete Laufräder über getrennte Kanäle angesaugt und in ein gemeinsames Spiralgehäuse gefördert. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Im Falle von 2-flutigen Pumpen wird die mechanische Belastung durch die symmetrische Konstruktion reduziert, wodurch der auftretende Axialschub kompensiert werden kann. Diese Form der spezifischen Schubbelastung entsteht bei jeder Kreiselpumpenbauform aufgrund der Druckdifferenz auf beiden Seiten des Laufrades. Dabei wird die Last vom Medium über das Laufrad und die Welle auf die Lager der Pumpe übertragen. Die Art bzw. konstruktive Gestaltung der Axialentlastung einer Kreiselpumpe ist aufgrund der zu erwartenden Feststoffbeladung im Betrieb eine nicht zu unterschätzende Einflussgröße für die Maschinenauswahl oder gar für die Realisierbarkeit des gesamten Vorhabens (siehe Kapitel 5.4.2). Zur Reduzierung der Lagerbelastung sowie der Anfälligkeit bei Feststoffeintrag gibt es verschiedene konstruktive Einrichtungen (z.B. Entlastungskolben, -bohrungen, usw.), welche im Falle der 2-flutigen

¹⁹ http://www.ksb.com/linkableblob/ksb-de/2490646-650599/galleryMediumLsTn/Etanorm_Fig.O_img-galleryMediumLsTn.jpg (16.12.2015)

Ausführung jedoch für gewöhnlich nicht erforderlich sind. Hier erfolgt der Ausgleich durch die gleichmäßige Beaufschlagung der spiegelbildlich angeordneten Kanäle, wodurch sich die entgegengesetzt wirkenden Schubkräfte aufheben. Somit stellt diese Bauart aufgrund des gemeinsam genutzten Saugstutzens, Gehäuses, der Welle und Lagerung eine technisch sinnvolle und kostengünstige Alternative zum Einsatz zweier baugleicher Einzelmaschinen in Parallelschaltung dar. (Bohl und Elmendorf, 2004)

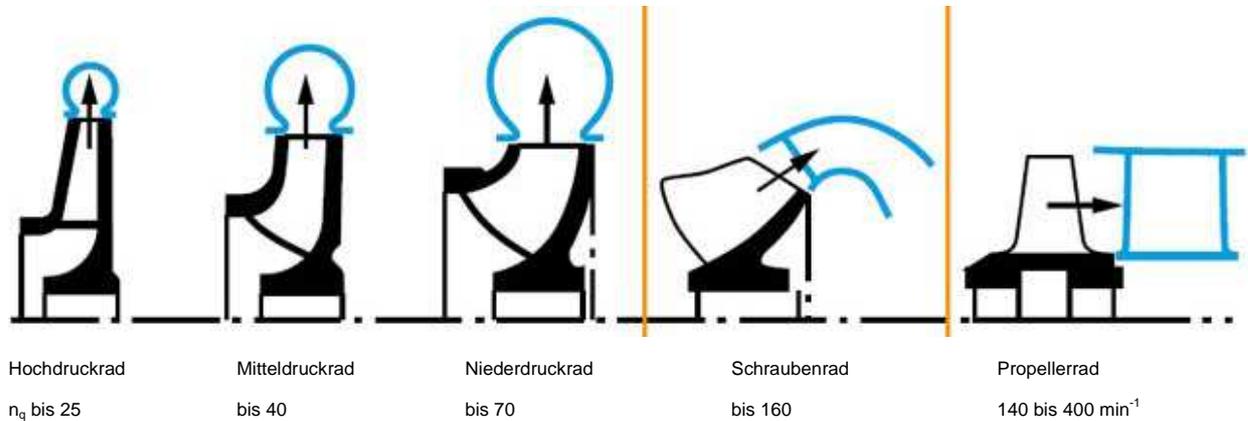


Abbildung 3.5: Verschiedene Laufradformen von Kreiselpumpen, verändert nach Hellmann (2009)

Im Hinblick auf die Lagerung und die Anbringung des Antriebsaggregats werden bei Kreiselpumpen im Wesentlichen zwei Optionen unterschieden. Entweder erfolgt die Installation in Grundplattenbauweise, bei der Pumpe und Antriebsaggregat auf einer gemeinsamen Grundplatte bzw. einem gemeinsamen Grundrahmen montiert sind und über eine Kupplung (ggf. durch ein Getriebe und zwei Kupplungen) mechanisch verbunden werden. Oder die Installation erfolgt in Blockausführung, wobei das Laufrad der Pumpe direkt auf der Motorwelle sitzt, wodurch eine besonders platzsparende Bauweise ermöglicht wird. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Da sich Kreiselpumpen aufgrund ihrer technischen, ökonomischen und betrieblichen Vorzüge außerordentlich bewährt haben und in der Wasserversorgung am häufigsten Anwendung finden, wurde dieser Pumpentyp auch bei der Realisierung der Wasserförderanlage *Bribin* gewählt. Im Weiteren werden daher die maßgeblichen Eigenschaften von Kreiselpumpen beschrieben. Auch der im Rahmen der vorliegenden Dissertation erarbeitete und in Kapitel 1 vorgestellte Ansatz zur Implementierung hochangepasster wasserkraftbetriebener Pumpsysteme (WPS) wurde für die Anwendung von Fördersystemen auf Basis von Kreiselpumpen konzipiert.

3.3 Hydraulik von Kreiselpumpen

3.3.1 Einsatzbereiche

Neben der Laufradform können Kreiselpumpen auch durch die Einbaulage und Aufstellungsart charakterisiert werden (Bohl und Elmendorf, 2004). Die Installation kann sowohl vertikal als auch horizontal erfolgen. Die Aufstellungsart richtet sich danach, ob die Pumpe bzw. das Aggregat aus Pumpe und Motor nass oder trocken installiert wird, also ob die Installation ober- oder unterhalb des saugseitigen Wasserspiegels erfolgt. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 enthalten Informationen über die Abhängigkeit zwischen Pumpenbauart und gängigen Einsatzbereichen bzw. Kenngrößen.

Tabelle 3.1: Spezifische Drehzahl und Förderhöhen für Pumpen verschiedener Bauart (Karger und Hoffmann, 2013)

Kenngröße	Pumpenbauart		
	Radial	Halbaxial/diagonal	Axial
Spezifische Drehzahl n_q in $[\text{min}^{-1}]$	10 bis 60	50 bis 150	100 bis 500
Förderhöhe H_P in [m]	Einstufige Normalausführung	Bis ca. 250	Bis ca. 90
	Mehrstufig	Bis ca. 1.000	n.v.
			Bis ca. 18
			Bis ca. 40

Tabelle 3.2: Einfluss der Bauart auf Einsatzbereiche von Kreiselpumpen (Karger und Hoffmann, 2013)

Einsatzbereiche	Pumpenbauart
Förderung aus Brunnen und Schächten	Unterwassermotor-, Bohrlochwellen-, Tauchmotorpumpen
	Gliederpumpen, Spiralgehäusepumpen
Förderung aus oberirdischen Gewässern (Direktentnahme)	Unterwassermotorpumpen, Tauchmotorpumpen
	Gliederpumpen, Rohrgehäusepumpen
	Bohrlochwellenpumpen, Spiralgehäusepumpen
Förderung in Rohrleitungssystemen	Unterwassermotorpumpen, Spiralgehäusepumpen
	Gliederpumpen

3.3.2 Anlagenförderhöhe und Verlusthöhe

Im Rahmen der Implementierung einer technischen Einrichtung stellt die Machbarkeitsprüfung die Basis für eine eingehende ökonomische und ökologische Bewertung dar. Denn sowohl für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung als auch für eine Analyse etwaiger Umwelteinflüsse ist die Definition eines konkreten technischen Systems erforderlich. Im Falle einer Wasserförderanlage ist die Anlagenförderhöhe H_A eine maßgebende Größe bei der Überprüfung der Machbarkeit bzw. bei der anschließenden Planungsphase. Um diese Förderhöhe zu überwinden, müssen ein realisierbares Konzept ausgearbeitet sowie geeignete Maschinen identifiziert werden.

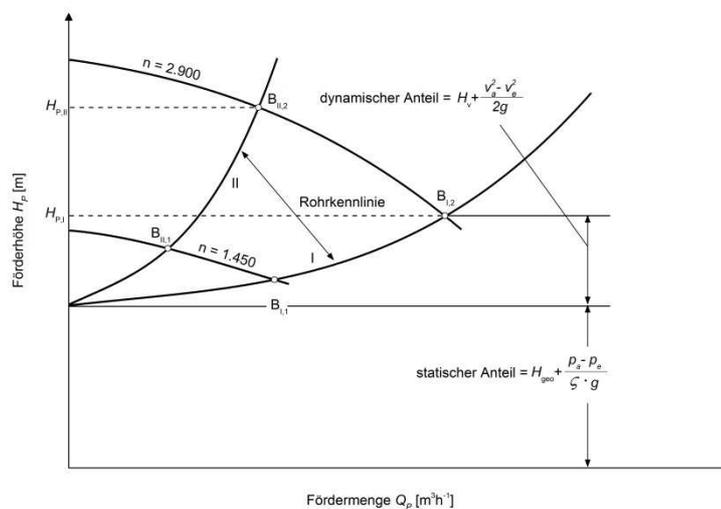


Abbildung 3.6: Pumpenkennlinien für verschiedene Drehzahlen sowie flache (I) und steile (II) Rohr- bzw. Anlagenkennlinie, verändert nach Karger und Hoffmann (2013)

3 Wasserförderung: Historische, aktuelle und innovative Ansätze

Die Anlagenförderhöhe H_A setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Anteil zusammen (siehe Gleichung (3.1) und Abbildung 3.6). Ersterer besteht aus der konstanten geodätischen Förderhöhe H_{geo} sowie dem Druckunterschied zwischen Ein- und Auslassquerschnitt. Letzterer besteht aus der Differenz der Geschwindigkeitshöhen sowie aus der systemspezifischen Verlusthöhe H_V (Karger und Hoffmann, 2013). Abbildung 3.6 stellt die Anlagenkennlinie als Funktion der Fördermenge Q_P dar.

$$H_A = H_{geo} + \frac{p_a - p_e}{\rho g} + \frac{v_a^2 - v_e^2}{2g} + H_V \quad (3.1)$$

Handelt es sich beim Systemein- und -austritt um offene Behälter, so kann der Druckunterschied von Eintritts- zu Austrittsquerschnitt vernachlässigt werden. Weiterhin zeigt die Praxiserfahrung, dass die Differenz der Geschwindigkeitshöhen i.d.R. ebenfalls vernachlässigt werden kann sofern die Querschnitte „a“ und „e“ ausreichend groß bzw. in etwa gleich groß sind, wodurch sich Gleichung (3.1) deutlich vereinfachen lässt (siehe Gleichung (3.2)). (Karger und Hoffmann, 2013)

$$H_A \approx H_{geo} + H_V \quad (3.2)$$

Die Verlusthöhe H_V einer Anlage ist proportional zum Quadrat der Fördermenge Q_P bzw. zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit v des Fördermediums und wird maßgeblich durch die Wahl der Rohrdurchmesser beeinflusst. (Karger und Hoffmann, 2013)

$$H_V \sim Q_P^2 \sim v^2 \quad (3.3)$$

Bei konstanter Fördermenge führen kleine Rohrdurchmesser zwar zu geringeren Anschaffungskosten bzgl. der Rohrleitung sowie in Bezug auf die erforderlichen Armaturen, jedoch ergeben sich dem o.g. Zusammenhang zufolge auch höhere Geschwindigkeiten und somit höhere energetische Verluste im Betrieb. Um diese strömungsbedingten Energieverluste kompensieren zu können, muss eine Pumpe mit ausreichend hoher Leistung ausgewählt werden, wodurch wiederum die spezifischen Investitionskosten für die Maschine zunehmen. Große Rohrdurchmesser hingegen bedingen ein höheres *Investment* bei Rohrleitung und Armaturen, jedoch geringere Strömungsverluste und somit auch ein geringeres *Investment* für die Pumpe sowie geringere Betriebskosten. Dieser Zusammenhang lässt erahnen, dass die technische und ökonomische Auslegung eines Wasserfördersystems als hoch-iterativer Prozess beschrieben werden kann. (Karger und Hoffmann, 2013)

3.3.3 Kennlinien und Kenngrößen

Pumpenkennlinie (Drosselkurve)

Zwei maßgebliche Kenngrößen einer Kreiselpumpe sind Fördermenge Q_P und Förderhöhe H_P . Beide Größen stehen in gegenseitiger Abhängigkeit und können durch die für eine Pumpe charakteristische, primär durch die Laufradform beeinflusste Pumpenkennlinie dargestellt werden („Drosselkurve“, siehe Abbildung 3.7).

Meist wird die Pumpenkennlinie berechnet und anschließend auf einem Prüffeld durch praktische Versuche validiert. Je nach Pumpenbauart bzw. Laufradart gibt es steile und flache, stabile und instabile Drosselkurven, die jeweils bei konstanter Drehzahl n die Förderhöhe H_P als Funktion der Fördermenge Q_P darstellen (Bohl und Elmendorf, 2004). Bei steilen (flachen) Kennlinien erfolgt bereits bei einer geringfügigen Änderung der Fördermenge (Förderhöhe) eine starke Veränderung der Förderhöhe (Fördermenge). Je nach Anwendungsfall muss daher entschieden werden, welche der beiden Varianten für die gegebenen Randbedingungen besser geeignet ist.

Stabile Kennlinien kommen sowohl bei Axial- als auch bei Radialmaschinen vor und können als streng monoton und stetig bezeichnet werden. D.h. jeder Fördermenge ist nur eine Förderhöhe zugeordnet. Im Falle von instabilen Kennlinien ist im Bereich großer Förderhöhen bzw. geringer Fördermengen keine eindeutige Zuordnung möglich, da die Kennlinien zwar stetig, jedoch nicht streng monoton verlaufen. Weiterhin wird zwischen „einfachen“ und „sattelförmigen“ instabilen Kennlinien unterschieden – erstere kommen vornehmlich bei Radialpumpen, letztere eher bei Axialmaschinen vor. Turbomaschinen dürfen jedoch nur auf dem stabilen Teil der Drosselkurve betrieben werden, der instabile Bereich muss im Betrieb zuverlässig ausgeschlossen werden. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Der Schnittpunkt aus Drosselkurve und Anlagenkennlinie ergibt den sich selbst einstellenden Betriebspunkt einer Strömungsmaschine (siehe Abbildung 3.6). Bei der Auslegung einer Pumpe ist daher darauf zu achten, dass die am häufigsten zu erwartende Fördermenge, die korrespondierende Förderhöhe sowie das Wirkungsgradoptimum möglichst nahe am Betriebspunkt liegen. (Karger und Hoffmann, 2013)

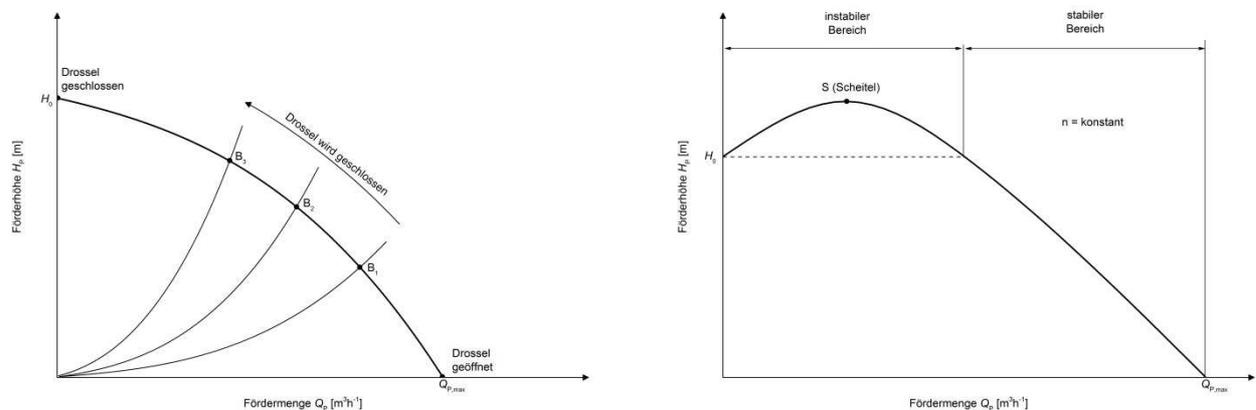


Abbildung 3.7: Stabile (links) und instabile Drosselkurven (rechts), verändert nach Bohl und Elmendorf (2004)

Leistung und Wirkungsgrad

Die Antriebsleistung einer Pumpe lässt sich als die an der Pumpenwelle vom Antrieb aufgenommene mechanische Leistung P_{PA} beschreiben. Diese Größe kann weiterhin als Funktion dritten Grades von der Fördermenge Q_P sowie als Summe aus der theoretischen Pumpenleistung $P_{P,th}$ und der Verlustleistung P_V beschrieben werden. Bei Radialrädern steigt die Leistungskurve i.d.R. mit zunehmender Fördermenge und sinkender Förderhöhe bis zum Erreichen des Maximums an und fällt danach wieder ab (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011).

Bei der Auslegung des Antriebsaggregats einer Kreiselpumpe muss beachtet werden, dass die Antriebsleistung mindestens der im ungünstigsten Betriebspunkt (welcher i.d.R. bei der kleinstmöglichen Förderhöhe liegt) erforderlichen Leistung entspricht. In der Praxis wird dieser

größte zu erwartende Leistungsbedarf zusätzlich mit einem Sicherheitsbeiwert S beaufschlagt, da die Leistung des Antriebsaggregats aufgrund verschiedener Verlustquellen ($\eta_{Komp.}$ für Getriebe, Kupplungen usw.) nicht vollständig bei der Kreiselpumpe ankommt (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Gleichsam können somit auch unerwünschte Leistungserhöhungen im Betrieb kompensiert werden, welche bspw. aufgrund von Abweichungen vom Nennbetriebspunkt, durch Drehzahlabweichung oder durch Verschleißerscheinungen auftreten (Hellmann, 2009). Internationale technische Regelwerke beschreiben diesen Sicherheitsbeiwert in Abhängigkeit des Anwendungsfalles bzw. des Fördermediums. Bei geringen Antriebsleistungen sind Aufschläge von nahezu 40 % erforderlich, um einen kontinuierlichen Betrieb gewährleisten zu können; oberhalb einer Leistung von ca. 100 kW liegt der Zuschlag konstant bei 10 % (Hellmann, 2009). Unter Berücksichtigung dieses Sicherheitsbeiwerts sowie der auftretenden Wirkungsgrade kann die Berechnung des Leistungsbedarfs des Pumpenaggregats P_{PA} durch folgende Gleichung beschrieben werden.

$$P_{PA} = \frac{P_{P,th}S}{\eta_{PA}} = \frac{\rho g Q_P H_P S}{\eta_A \eta_P \eta_{Komp.}} \quad (3.4)$$

Mutschmann und Stimmelmayer (2011) zufolge ist der Wirkungsgrad des Pumpenaggregats η_{PA} bei modernen Maschinen im Bereich von 0,6 bis 0,8 anzusiedeln. Die Kupplungswirkungsgrade werden bestimmt durch das Massenträgheitsmoment sowie die Umfangsgeschwindigkeit der Kupplung. Bei modernen Komponenten sind die auftretenden Verluste jedoch i.d.R. vernachlässigbar. Beim Getriebe sind je nach Leistungsklasse, Getriebetyp und technischem Zustand Wirkungsgrade von teils deutlich über 0,9 möglich. Der Teilwirkungsgrad der Pumpe η_P erreicht in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen, von der Baugröße sowie vom technischen Zustand der Maschinen üblicherweise Werte von 0,7 bis 0,9. Der Wirkungsgrad von Elektromotoren η_A liegt je nach Maschinenklasse zwischen 0,72 bis 0,97 (Hellmann, 2009).

Spezifische Drehzahl

Die spezifische Drehzahl n_q ist eine aus der Ähnlichkeitsmechanik stammende Kenngröße, die bei verschiedenen Betriebsdaten das Vergleichen von Laufrädern ermöglicht. Mithilfe dieser Kennzahl können die optimale Bauform sowie die zugehörige Kennlinie für einen bestimmten Anwendungsfall bestimmt werden. Definiert wird diese Kenngröße als gedachte Drehzahl eines geometrisch ähnlichen Laufrades mit einer Fördermenge Q_P von $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und einer Förderhöhe H_P von 1 m im Punkt des optimalen bzw. maximalen Wirkungsgrades η_{opt} und weist die gleiche Dimension $[\text{min}^{-1}]$ wie die Maschinendrehzahl n auf. (Hellmann, 2009)

$$n_q = n \frac{\sqrt{Q_{P,opt}}}{(H_{P,opt})^{3/4}} \quad (3.5)$$

Bei mehrstufigen Pumpen wird für $H_{P,opt}$ die optimale Förderhöhe einer Pumpenstufe und bei 2-flutigen Pumpen die optimale Fördermenge $Q_{P,opt}$ einer Laufradhälfte angesetzt. Mit zunehmender spezifischer Drehzahl wird das Laufrad einer Kreiselpumpe mit zunächst radialem Austritt mehr und mehr halbaxial bzw. diagonal und letztlich axial durchströmt. (Hellmann, 2009)

Net Positive Suction Head (NPSH, englisch: Haltedruckhöhe)

Pumpen können flüssige Fördermedien ansaugen, da die Druckdifferenz zwischen der Flüssigkeitsoberfläche des Vorratsbehälters und dem Inneren der Pumpe (Vakuum) das Medium tendenziell in das Pumpengehäuse drängt. Demnach ist der herrschende Umgebungsluftdruck äquivalent zur größten theoretischen Saughöhe. Der Dampfdruck des Fördermediums stellt hierbei jedoch eine Untergrenze dar, deren Unterschreitung zur Dampfblasenbildung innerhalb des Mediums führt. Diese Dampfblasen stören die kontinuierliche Förderung und können überdies bei einer Druckerhöhung durch spontanes Implodieren eine erhebliche mechanische Belastung für strömungsführende Bauteile darstellen. Letztgenannter Vorgang wird als „Kavitation“ bezeichnet und soll im Betrieb zuverlässig ausgeschlossen bzw. auf ein tolerierbares Maß begrenzt werden, um Maschinenschäden nach Möglichkeit vermeiden zu können. Dies kann realisiert werden, indem konstruktiv dafür gesorgt wird, dass die Nettoenergiehöhe im Eintrittsquerschnitt der Pumpe über der Verdampfungsdruckhöhe liegt (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Eine Aussage in Bezug auf die Sicherheit im Eintrittsquerschnitt gegenüber Auswirkungen der Kavitation kann mithilfe des Kennwerts *NPSH* (englisch: *Net positive suction head*) erfolgen (Hellmann, 2009). Diese Nettoenergiehöhe, die den Begriff der Haltedruckhöhe in der Praxis abgelöst hat, ist die absolute Energiehöhe im Saugstutzen der Pumpe abzüglich der temperaturabhängigen Verdampfungsdruckhöhe (Hellmann, 2009).

Beim Eintritt der Strömung in das Laufrad kommt es in Abhängigkeit von Drehzahl, Geometrie des Laufradeintritts, Dichte und Viskosität des Fördermediums usw. zur Absenkung des statischen Drucks im Vergleich zum Wert vor dem Laufrad. Zur Kavitationsvermeidung muss daher vor dem Laufrad ein Druck herrschen, der ausreichend größer als der Dampfdruck des Fördermediums ist. Bei der Betrachtung des *NPSH*-Wertes wird zwischen einem anlagenseitigen *NPSH_A* (englisch: *Net Positive Suction Head Available*) und einem maschinenspezifischen *NPSH_R* (englisch: *Net Positive Suction Head Required*) Wert unterschieden. Bei der Auslegung einer Förderanlage ist somit darauf zu achten, dass der Wert der Pumpe kleiner als der der Anlage ist, d.h. folgende Bedingung muss erfüllt sein. (Hellmann, 2009)

$$NPSH_R < NPSH_A \quad (3.6)$$

Der maschinenspezifische Wert *NPSH_R* hängt vom Pumpentyp sowie vom jeweiligen Betriebspunkt ab und wird experimentell auf dem Prüffeld des Herstellers ermittelt. Bei der Planung einer Pumpanlage erfolgt die Auswahl einer geeigneten Pumpe i.d.R. auf Basis eines für die jeweilige Anwendung geeigneten Kavitationskriteriums. (Hellmann, 2009)

Gulich (2010) zufolge legen diese Kriterien bspw. das Maß der tolerierbaren Einschränkung der Förderhöhe oder des Wirkungsgrades fest bzw. setzen Grenzen für Geräuschentwicklung oder für die Lebensdauer des Laufrades. Unter den praxisrelevanten Kriterien findet aufgrund der einfachen messtechnischen Erfassbarkeit der Begriff *NPSH₃* (kavitationsbedingter Förderhöhenabfall um 3 %) am häufigsten Anwendung. Zur Gewährleistung eines sicheren Anlagen- bzw. Maschinenbetriebs muss der *NPSH_A*-Wert der Anlage gemäß der Forderung aus der Gleichung (3.6) noch mit einem Sicherheitswert beaufschlagt werden, um in allen Betriebspunkten eine ausreichende Differenz zum *NPSH_R*-Wert der Maschine sicherstellen zu können. Generell sollten bei neuen Pumpanlagen die Maschinen im Zulaufbetrieb aufgestellt werden, da andernfalls ein sicheres Ansaugen des Fördermediums konstruktiv gewährleistet werden muss (Bohl und Elmendorf, 2004).

Vollständiges Kennfeld

Ein vollständiges Kenn- oder Kennlinienfeld umfasst die grafische Darstellung aller Kennlinien, die zur technischen Beschreibung eines Strömungsmaschinentyps erforderlich sind. Enthalten sind die Drossel-, Leistungs- und Wirkungsgradkurve sowie im Falle von Kreiselpumpen die $NPSH_R$ -Kurve. Jede der genannten Kennlinien kann in Abhängigkeit verschiedener Parameter dargestellt werden (bspw. Laufraddurchmesser oder Drehzahl), wodurch eine geeignete Maschine für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt werden kann. (Hellmann, 2009)

Die beschriebenen Kennlinien beziehen sich auf den Normalbetriebsbereich einer Strömungsmaschine. Werden jedoch die Richtung der Durchströmung, der Drehsinn des Laufrades oder das Druckgefälle geändert, „können Kreiselpumpen [...] gewollt oder ungewollt in besondere Betriebsbereiche z.B. in den Turbinenbetrieb gefahren werden“ (Bohl und Elmendorf, 2004). Zur vollständigen Beschreibung aller möglichen Betriebspunkte einer Strömungsmaschine werden daher sogenannte 4-Quadranten-Kennfelder experimentell ermittelt.

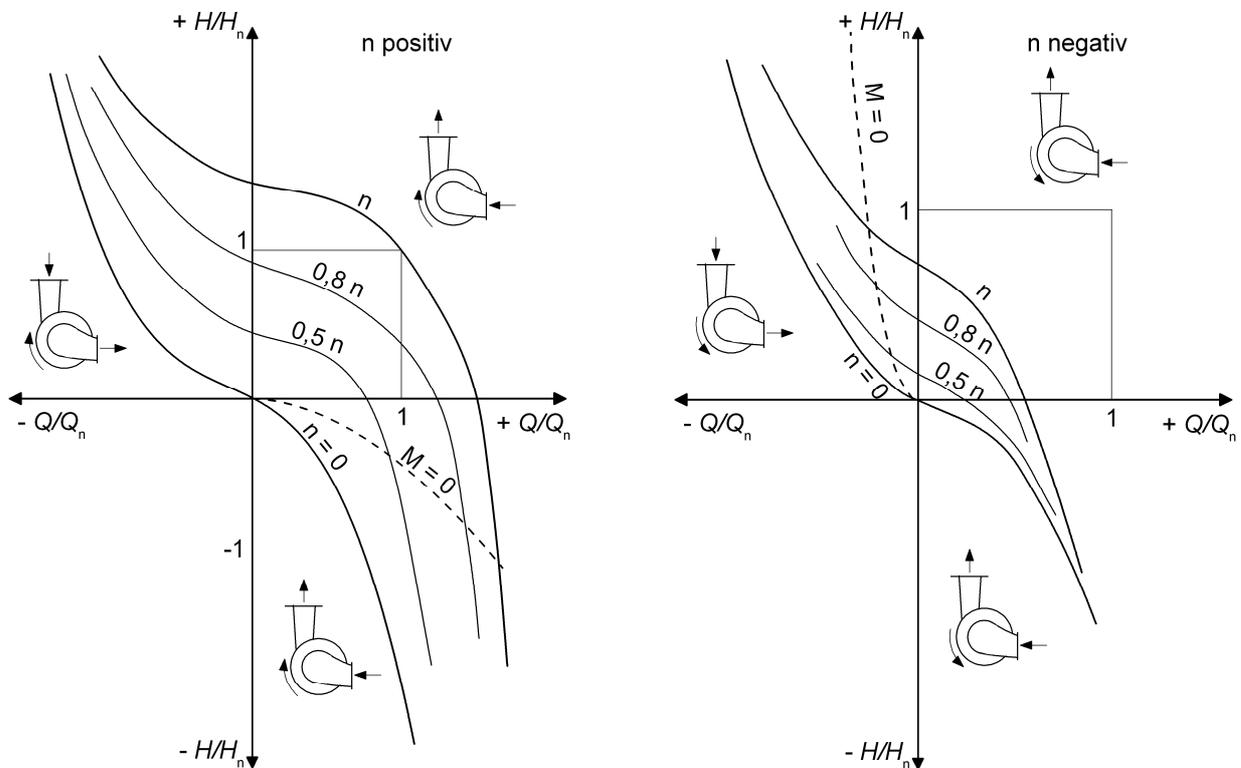


Abbildung 3.8: Vollständiges Kennfeld einer radialen Strömungsmaschine sowohl für den Pump- (links) als auch für den Turbinenbetrieb (rechts), verändert nach Bohl und Elmendorf (2004)

In Abbildung 3.8 sind Drehzahl und Fördermenge als relative Größen und somit in Prozent ihrer Auslegungswerte dargestellt, um eine leichtere Übertragung auf ähnliche Maschinen zu ermöglichen. Der normale Fahrbereich einer Kreiselpumpe betrifft lediglich den ersten Quadranten des dargestellten Q - H -Koordinatensystems; die drei weiteren Quadranten stellen das Verhalten der Maschine z.B. beim Ausfall des Antriebsmotors oder beim Anfahren dar (Hellmann, 2009). Bei Umkehrung der Strömungsrichtung (3. Quadrant) entspricht die Funktion der Kreiselpumpe der einer Turbine. Die technischen Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile des Einsatzes einer Kreiselpumpe als Turbine („Pumpe als Turbine“, PAT) werden in Kapitel 3.4 ausführlich erörtert.

3.3.4 Regelungsarten

Die Auslegung eines Pumpsystems erfolgt i.d.R. im Hinblick auf die Förderung einer bestimmten Menge des Fördermediums auf eine definierte Förderhöhe. Der Betriebspunkt liegt wie zuvor erörtert im Schnittpunkt der Anlagen- und Maschinenkennlinien und kann sowohl maschinen- als auch anlagenseitig beeinflusst werden.

Die Auswahl des am besten geeigneten Regelungssystems ergibt sich in Abhängigkeit von der Häufigkeit und Amplitude der zu erwartenden Veränderung der Betriebsparameter. Erfolgt die Konstruktion des Pumpsystems auf Basis einer eingeschränkten Datenbasis (siehe Kapitel 5.4), so ist die Möglichkeit zur nachträglichen Anpassung (Adaptierbarkeit) sowie zur autonomen Anpassungsfähigkeit des Systems während des Betriebs (Adaptivität) von entscheidender Bedeutung für einen effizienten und technisch-wirtschaftlich nachhaltigen Anlagenbetrieb.

Drossel- und Bypassregelung

Durch die Drossel- als auch durch die Bypassregelung ist eine Reduzierung der Fördermenge eines Pumpsystems realisierbar. Bei der Drosselregelung kann mithilfe einer Regelarmatur im Rohrleitungssystem die Anlagenkennlinie verändert werden, wodurch deren Verlauf steiler wird (siehe Abbildung 3.9, links) (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Der Betriebspunkt verschiebt sich bei diesem Beispiel von B_1 zu B_2 , da das Drosselorgan eine verzögernde Wirkung auf das Fördermedium ausübt und somit zu höheren energetischen Verlusten führt.

Aufgrund der einfachen Realisierbarkeit wird die Drosselregelung häufig bei Anlagen mit Kreiselpumpen kleiner oder mittlerer Leistung angewandt (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Aus energetischer Sicht weist diese Regelungsart deutliche Nachteile auf, da die durch die Pumpe aufgebrauchte Energiedifferenz vom ursprünglichen (B_1) zum neuen Betriebspunkt (B_2) am Drosselorgan in Form von Wärmeenergie dissipiert wird und somit verloren geht. Auch eine Verschlechterung des Pumpenwirkungsgrades ist durch die Verschiebung des Betriebspunktes zu erwarten (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). D.h. bei vergleichsweise geringen Investitionskosten ist die Drosselung aufgrund der Energieverluste mit hohen Betriebskosten verbunden, wodurch die Prüfung dieser Maßnahme aus wirtschaftlicher Sicht entscheidend ist.

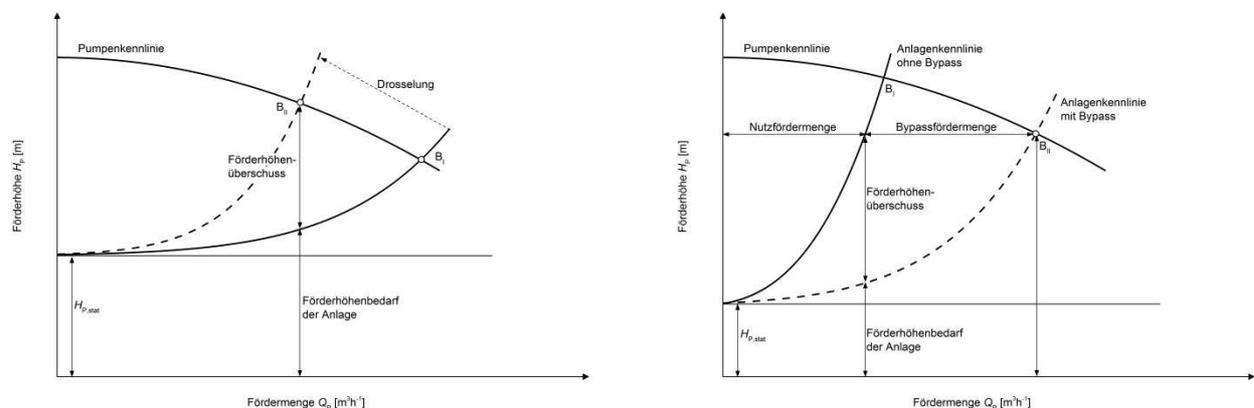


Abbildung 3.9: Drossel- (links) und Bypassregelung (rechts) von Kreiselpumpen, beide verändert nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)

Im Falle der Bypassregelung einer Kreiselpumpe wird ein Teil des Förderstroms von der Druck- zur Saugseite der Pumpe rückgeführt, wodurch ein ungleicher Förderstrom von Maschine und

Anlage realisiert werden kann (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Der Nutzförderstrom im neuen Betriebspunkt B_{II} wird im Vergleich zum ursprünglichen optimalen Punkt B_I durch diese Art der Regelung reduziert (siehe Abbildung 3.9, rechts). Bei instabilen Drosselkurven kann der Fall auftreten, dass bei geöffnetem Bypass ein größerer Volumenstrom durch die Anlage gefördert wird als bei geschlossener Rückführung (Bohl und Elmendorf, 2004).

Generell wirkt sich auch die Bypassregelung nachteilig aus durch hohe energetische Verluste, die mit teils erheblichen Gesamtwirkungsgradverlusten einhergehen. Bei Radialmaschinen (Axialmaschinen) mit verhältnismäßig flachen (steilen) Drosselkurven sind die Verluste durch Bypassregelung i.d.R. höher (geringer) als bei der Drosselregelung. Dies führt dazu, dass ein Bypass für größere Maschinen und längeren Teillastbetrieb als tendenziell unwirtschaftlich angesehen werden kann und daher höchstens bei intermittierendem Fördermengenbedarf bzw. schwankendem Dargebot des Fördermediums zum Einsatz kommt. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Drehzahlregelung

Die Drosselkurve einer Kreiselpumpe gilt für eine konstante Drehzahl n , deren Erhöhung (Reduzierung) zum Anheben (Absenken) der jeweils zugehörigen Drossel- und Leistungskurve führt. Gemäß den Affinitätsgesetzen, welche in Gleichung (3.7) dargestellt sind, können die Fördermenge Q , die Förderhöhe H sowie der Leistungsbedarf des Pumpenaggregats P_{PA} in Abhängigkeit von der Drehzahl n umgerechnet werden. (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011)

$$Q_{P2} = Q_{P1} \frac{n_2}{n_1}, H_{P2} = H_{P1} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, P_{PA2} = P_{PA1} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (3.7)$$

Wenngleich mit zunehmender statischer Förderhöhe das Zurückregeln (Hochregeln) zu schlechteren Teillastwirkungsgraden (Überlastwirkungsgraden) führt, so gilt die Drehzahlregelung doch allgemein als eine aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht sehr sinnvolle Regelungsart, da die Pumpe auch bei Veränderung der Betriebsdrehzahl nur die erforderliche Förderhöhe erzeugt. Der im Vergleich zur Drosselung höhere Investitionsbedarf einer Drehzahlregelung kann daher ggf. durch die geringeren Betriebskosten kompensiert werden. (Hellmann, 2009)

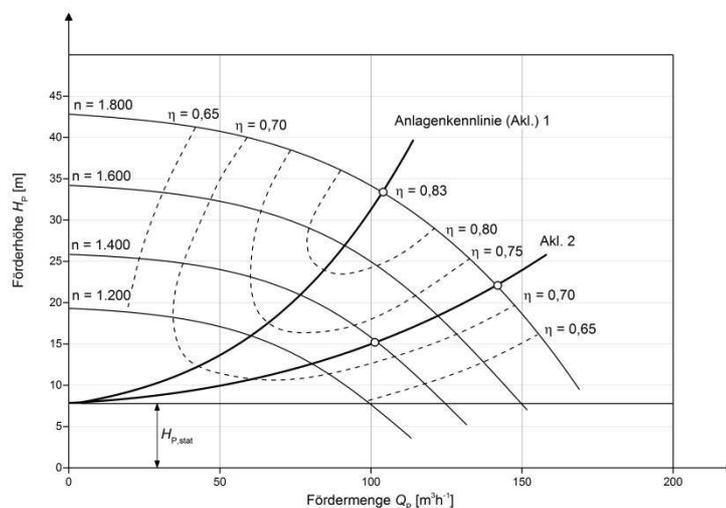


Abbildung 3.10: Einfluss der Drehzahl auf die Kennlinie einer Kreiselpumpe, verändert nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)

Vor-/Nachdrallregelung und Laufschaufelverstellung

Stehen der Realisierung einer der o.g. Regelungsarten technische, betriebliche und/oder ökonomische Gründe entgegen, so kann ggf. eine Strömungsmaschine mit integrierter Regeleinheit eingesetzt werden. Bohl und Elmendorf (2004) zufolge sind die drei gängigen Optionen zur internen Regelung einer Strömungsmaschine die Laufschaufelverstellung sowie die Vor- und die Nachdrallregelung.

- Verstellbare Laufschaufeln kommen bei axialen und halbaxialen Maschinen zum Einsatz und ermöglichen bei nahezu gleichbleibend hohen Wirkungsgraden die Variation von Fördermenge und -höhe.
- Die Vordrallregelung kann mit allen Kreiselpumpenbauformen kombiniert werden und bewirkt eine Verbesserung des Teillastbetriebs sowie eine Überhöhung der Normkennlinie (Maschinenkennlinie ohne Vordrallregelung).
- Im Falle der Nachdrallregelung, die primär bei Radialmaschinen eingesetzt wird, erfolgt ebenfalls eine Verbesserung des Teillastverhaltens durch eine effektivere Umwandlung des dynamischen in statischen Druck, wenngleich in diesem Bereich mit Wirkungsgradeinbußen zu rechnen ist. Im Vergleich zur Drosselregelung kommt es bei der Nachdrallregelung zu keiner Energiedissipation, weshalb die $Q-H$ -Kennlinie lediglich nach links zu kleineren Durchsätzen verschoben wird.
- Eine Kombination aus Vor- und Nachdrallregelung führt zu deutlich besseren Kennlinien als die Einzelnutzung.

Jede der genannten Regelungsarten zieht eine nicht zu vernachlässigende Steigerung der Maschinen- und Systemkomplexität nach sich, wodurch nicht zuletzt der technische und finanzielle Betriebs- und Wartungsaufwand deutlich erhöht wird. Insbesondere bei der Planung von Pumpenanlagen für Entwicklungs- und Schwellenländer darf die Komplexität des Systems bzw. der Maschinen nicht unterschätzt werden, da sie erheblichen Einfluss auf die Handhabbarkeit und somit auf den nachhaltigen Betrieb hat (Nestmann et al., 2012).

Parallel- und Reihenbetrieb

Als weitere Art der Regelung von Pumpen bzw. Pumpsystemen eignet sich die Parallelschaltung von zwei oder mehreren Pumpen vorwiegend bei stark schwankendem Förderstrom, unabhängig davon, ob dieser durch unterschiedlichen Bedarf oder durch Variation des Dargebots bedingt ist (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Je nach Bedarf können einzelne Pumpen an- oder ausgestellt werden und ermöglichen somit die Bearbeitung eines weiten Förderratenspektrums.

Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass der Betriebspunkt der Einzelmaschine nicht identisch mit dem aller Maschinen im Parallelbetrieb ist (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Grund hierfür ist die gemeinsame Speisung einer Druckleitung, wodurch sich bei steigendem (sinkendem) Durchfluss die Strömungsgeschwindigkeit und somit die Strömungsverluste erhöhen (reduzieren) (Karger und Hoffmann, 2013). Die resultierende Kennlinie des Gesamtsystems wird durch Addition der Volumenströme der Einzelmaschinen bei konstanter Förderhöhe bestimmt. Trotz der Kennlinienabweichung zwischen Einzelmaschine und Gesamtanlage können die Pumpen auch im Parallelbetrieb nahe am Optimum der Einzelmaschinen betrieben werden, wodurch eine hohe Effizienz der Gesamtanlage erzielt werden kann. Durch geeignete Dimensionierung bzw.

3 Wasserförderung: Historische, aktuelle und innovative Ansätze

Maschinenauswahl kann häufiges An- und Abfahren und somit eine hohe mechanische Belastung der Maschinen vermieden werden. Entscheidend für einen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Betrieb sind eine gemeinsame Nullförderhöhe H_0 sowie eine stabile Drosselkurve. Bei unterschiedlichen Nullförderhöhen würde die „kleinere“ Maschine bei Unterschreitung ihrer minimalen Fördermenge durch die „größere“ Maschine rückwärts zwangsdurchströmt und würde somit im 2. Quadranten betrieben, einhergehend mit hoher mechanischer Belastung durch Pulsation und Fördermengenschwankungen. Bohl und Elmendorf (2004)

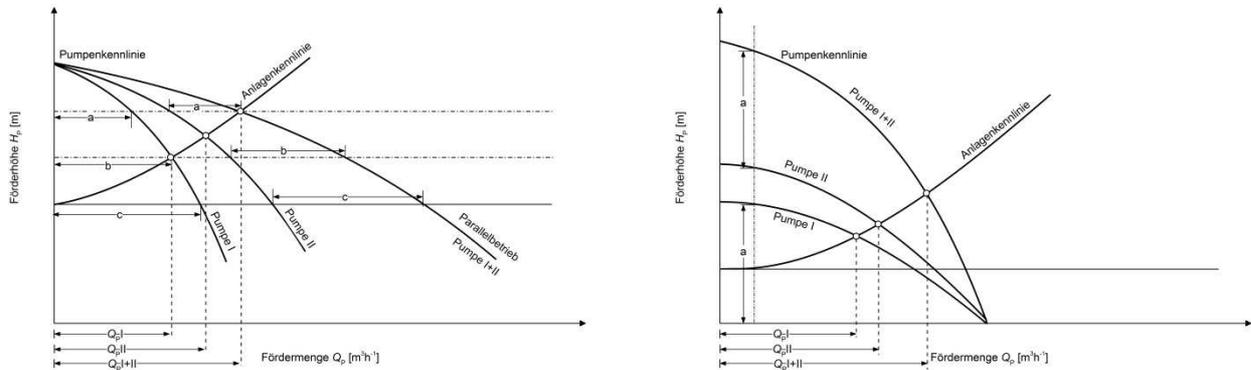


Abbildung 3.11: Parallelbetrieb (links) und Reihenschaltung (rechts) von Kreiselpumpen, beide verändert nach Mutschmann und Stimmelmayer (2011)

Eine Hintereinander- bzw. Reihenschaltung von zwei oder mehreren Kreiselpumpen eignet sich lediglich zur Überwindung großer Anlagenwiderstände, nicht aber zu Regelung der Fördermenge (siehe Abbildung 3.11). So wird die theoretische Addition der beiden Förderhöhen bei einer gemeinsamen Fördermenge in Realität insbesondere durch eine ungünstige Anströmung der zweiten, dritten usw. Maschine reduziert. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Maschinenmodifikation

Die Notwendigkeit einer Regelung von Pumpen bzw. Pumpenanlagen ergibt sich i.d.R. bei variablen Betriebsbedingungen wie schwankendem Dargebot des Fördermediums oder bei Förderung auf unterschiedliche Höhen. Drosselarmaturen, Bypässe, mechanische bzw. mechatronische Einrichtungen zur Drehzahlveränderung, Vor- und Nachdrallregelung, Laufschaufelverstellung sowie die Parallelschaltung mehrerer Maschinen stellen dabei betriebliche Maßnahmen zur Regelung von Strömungsmaschinen dar. Die Anwendbarkeit der verschiedenen Regelungsarten richtet sich insbesondere nach der Pumpenbauart, ist jedoch weitestgehend unabhängig davon, ob es sich um eine einfache Standard- oder um eine modifizierte Maschine handelt (Hellmann, 2009).

Eine Pumpe als i.d.R. standardisierte Serienmaschine – dies gilt insbesondere für den mittleren Leistungsbereich – kann daher auch konstruktiv verändert werden, um sie auf bestimmte Betriebsbedingungen abzustimmen. Praxiserprobte Maßnahmen sind hierbei die Anpassung des Laufrades einer Kreiselpumpe durch Zuspitzen bzw. Zuschärfen, Aus- und Abdrehen. Eine weitere Option zur Modifikation ist die Veränderung der Schaufelzahl, welche bei axialen Strömungsmaschinen Anwendung findet. Der Verringerung der Schaufelzahl folgt bei nahezu gleichbleibendem Wirkungsgradverlauf eine Verschiebung der Drosselkurve zu kleineren Fördermengen und -höhen, wodurch die Leistungskurve und somit der -bedarf deutlich absinkt.

Sämtliche konstruktive Maßnahmen führen zur Anwendbarkeit der Maschinen für bestimmte Betriebsbedingungen. Sie eignen sich jedoch nicht für eine betriebliche Anpassung an veränderliche Rahmenbedingungen. (Bohl und Elmendorf, 2004)

3.4 Hydraulik von rückwärtslaufenden Kreiselpumpen

Die Funktionsumkehr einer Pumpe führt zu deren Betrieb als Turbine („Pumpe als Turbine“, PAT). Bei Nutzung einer Kreiselpumpe ist der inverse Betrieb möglich, ohne, dass es einer konstruktiven Änderung oder mechanischen Bearbeitung von Laufrad und/oder Gehäuse bedarf (Bohl und Elmendorf, 2004). Im inversen Betrieb wird die Maschine vom Druck- zum Saugstutzen durchströmt und wirkt dadurch auf den Druckverlauf wie eine Drossel (Hellmann, 2009).

Der Betriebspunkt einer invers betriebenen Kreiselpumpe stellt sich analog zum Regelbetrieb durch den Schnittpunkt der Maschinen- und der Anlagenkennlinie ein. Im sogenannten „Umkehrbetrieb“ können i.d.R. gute Wirkungsgrade – vergleichbar zum Pumpenbetrieb – erzielt werden. Sobald die Druckenergie bzw. Fallhöhe am Druckstutzen einen kritischen Wert übersteigt und das Losbrechmoment von Welle und Laufrad überwindet, kann der Strömung Energie entzogen und über die Welle der PAT als mechanische oder – bei entsprechender Wandlung – auch als elektrische Energie nach außen abgeführt werden. (Hellmann, 2009)

Unabhängig von der Maschinenbauform ergeben sich im Turbinenbetrieb stets geringere spezifische Drehzahlen als im Pumpenbetrieb. Bei gleicher Betriebsdrehzahl liegen die Durchsatzmenge sowie die abgebaute Fallhöhe im Wirkungsgradmaximum des Turbinenbetriebs stets höher als im Pumpenbetrieb. Die Wirkungsgrade unterscheiden sich im Bestpunkt i.d.R. um lediglich $\pm 2\%$ (insbesondere bei Maschinen des mittleren und oberen Leistungsbereichs), wobei im Turbinenbetrieb insbesondere bei kleinen spezifischen Drehzahlen höhere Werte ermittelt werden. Der Grund ist die höhere Turbinenleistung im Vergleich zur Pumpenleistung, wodurch der Einfluss der Nebenverluste sinkt. Bei halbaxialen und axialen Kreiselpumpen werden geringere Wirkungsgrade im Turbinenbetrieb erzielt, da die Druckkanten der Laufradschaufeln nicht für die Turbinenströmung konstruiert sind. (Gülich, 2010)

Um Kavitation bzw. die unerwünschten Auswirkungen der Kavitation wie z.B. Materialabtrag, Schwingungen, Geräuschentwicklung usw. im Betrieb zuverlässig ausschließen zu können, erfordert der Turbinenbetrieb einer Kreiselpumpe einen minimalen Gegendruck am Austrittsstutzen (Eintrittsstutzen im Pumpenbetrieb). Basierend auf Praxiserfahrungen kann einer Faustregel zufolge der $NPSH_R$ -Wert der PAT auf 35 bis 50 % des $NPSH_R$ -Wertes der Pumpe beziffert werden. (Gülich, 2010)

Die mechanischen Belastungen der Maschine sind im inversen Betrieb sowohl radial als auch axial deutlich geringer als im Regel- bzw. Pumpenbetrieb. Die auftretenden Radialkräfte sind aufgrund der weitestgehend ablösungsfreien Strömung des Fluides durch das Spiralgehäuse und die dadurch sehr geringen Strömungsstörungen vergleichsweise klein. Auch die Axialkräfte liegen Untersuchungen zufolge bei 40 bis 70 % der Kräfte des Pumpenbetriebs. (Gülich, 2010)

3.4.1 Leerlauf- und Widerstandskennlinie

Das zugehörige Turbinenkennfeld liegt im dritten Quadranten der Kreiselpumpe und wird durch zwei Kennlinien eingeschlossen, welche die technischen Grenzen für den Turbinenbetrieb darstellen. Die Leerlaufkennlinie (siehe Abbildung 3.8) wird bei unbelasteter, ungebremster und

frei durchdrehender Turbine definiert und zeigt eine Zunahme der Leerlaufdrehzahl bei steigender Fallhöhe. (Bohl und Elmendorf, 2004) Die Widerstands- oder auch Festbremskennlinie (siehe Abbildung 3.8) stellt den Zusammenhang zwischen Schluckvermögen und Fallhöhe bei stehender Maschine dar (Bohl und Elmendorf, 2004). Dabei stellt sich bei feststehendem Laufrad und einer bestimmten Fallhöhe ein entsprechender Durchfluss ein, der maßgeblich durch innere Strömungswiderstände beeinflusst wird (Gülich, 2010). Das dabei auftretende Wellendrehmoment oder Festbremsmoment M_W ist proportional zur anliegenden Fallhöhe H_T (Gülich, 2010).

Im Falle des Lastabwurfs (plötzlicher Ausfall der Lastabnahme) verringert sich der Durchfluss einer Radialmaschine, da die Leerlaufkennlinie über der Widerstandskennlinie liegt (Gülich, 2010). Die sich in diesem Fall innerhalb kürzester Zeit einstellende Drehzahl wird als Durchgangsdrehzahl bezeichnet und liegt deutlich über der Nenndrehzahl im Regelbetrieb (Hellmann, 2009). Die PAT sowie angekoppelte Bauteile und Maschinen müssen auf diese Drehzahl bzw. auf die resultierenden Umfangsgeschwindigkeiten ausgelegt sein, da andernfalls erhebliche Schäden auftreten können. Die rasche Abnahme des Durchsatzes kann teils erhebliche Druckstöße in den Rohrleitungen zu Folge haben, wodurch die Drehzahl der PAT weiter erhöht werden kann. Zur Reduzierung des Druckstoßrisikos liegen der Betriebspunkt sowie der Überlastbereich der Betriebskennlinie einer PAT daher i.d.R. nahe der Widerstandskennlinie (Hellmann, 2009). Aus Sicherheitsgründen sind weiterhin konstruktive Maßnahmen wie bspw. der Einsatz von durchschlagssicheren Kupplungen zwischen PAT und Lastabnehmer oder schnellschließenden Bremsen für die PAT unverzichtbar.

Die Bestimmung der Leerlauf- und Widerstandskennlinie sowie der hydraulischen Verluste erfolgt i.d.R. experimentell durch messtechnische Versuche auf einem Prüffeld, da hierdurch die realen Werte der Maschine ermittelt werden können. Sind Versuche aus technischer und/oder ökonomischer Sicht nicht durchführbar, können die Kennlinien mittels „statistischer Korrelation“ abgeschätzt werden. Hierzu werden die maschinenspezifischen Kenngrößen im Wirkungsgradoptimum des Turbinen- auf die des Pumpenbetriebs umgerechnet. Wenngleich zur Bestimmung dieser Korrelationen eine Vielzahl von Maschinen praktischen Tests unterzogen wurden, so kann eine gewisse Streuung der resultierenden Ergebnisse und somit der Berechnungsansätze nicht ausgeschlossen werden. Des Weiteren können die geometrischen Eigenschaften der einzelnen Maschinen nur bis zu einem gewissen Grad zutreffend abgebildet werden. In der Praxis wird daher nach Möglichkeit ein experimenteller Nachweis gegenüber den rechnerischen Ansätzen bevorzugt, wenngleich dieser Mehraufwand der Eigenschaft einer angepassten Technologie entgegenstehen kann. (Gülich, 2010)

3.4.2 Regelungsarten

Eine invers betriebene Pumpe hat im Vergleich zu einer konventionellen Turbine keinen justierbaren Leitapparat und kann auch nicht durch eine Anpassung der Laufschaufelstellung auf unterschiedliche Betriebszustände eingestellt werden (Oberle et al., 2009). Bei der Auslegung einer PAT wird daher ein Optimum der Betriebsparameter im Bereich des zu erwartenden Betriebspunktes angestrebt, der sich als Schnittpunkt zwischen Betriebs- und Anlagenkennlinie definiert (Bohl und Elmendorf, 2004). Beidseitig vom Optimum fällt der Wirkungsgradverlauf einer PAT jedoch deutlich steiler ab als bei einer regelbaren Turbine, weshalb ein effizienter Betrieb nahezu konstante Bedingungen erfordert. Wechselnde Betriebszustände können daher nur mithilfe externer Regeleinrichtungen gefahren werden. (Bohl und Elmendorf, 2004)

Drossel- und Bypassregelung

Eine Drosselregelung kann eingesetzt werden, wenn eine PAT bei einer Reduzierung des Durchsatzes das herrschende Druckpotential zunehmend schlechter verarbeiten kann. In diesem Fall wird der Energieüberschuss bzw. die Leistungsdifferenz P_V zwischen Anlagen- und Turbinenkennlinie bei einem bestimmten Durchsatz an einer der PAT vorgeschalteten Drosselarmatur dissipiert. Aufgrund der Auslegung einer PAT auf eine bestimmte Betriebsdrehzahl sowie aufgrund der unveränderlichen Laufradbeschaufelung kann eine PAT keinen Volumenstrom verarbeiten, der größer ist als im Schnittpunkt von Betriebs- und Anlagenkennlinie. Muss jedoch der Durchsatz in der Anlage entspannt werden, so muss das überschüssige Fluid über einen Bypass abgeführt und die gesamte Fallhöhe abgedrosselt werden; der Energieüberschuss bzw. die Verlustleistung P_V wird somit dissipiert. (Gülich, 2010)

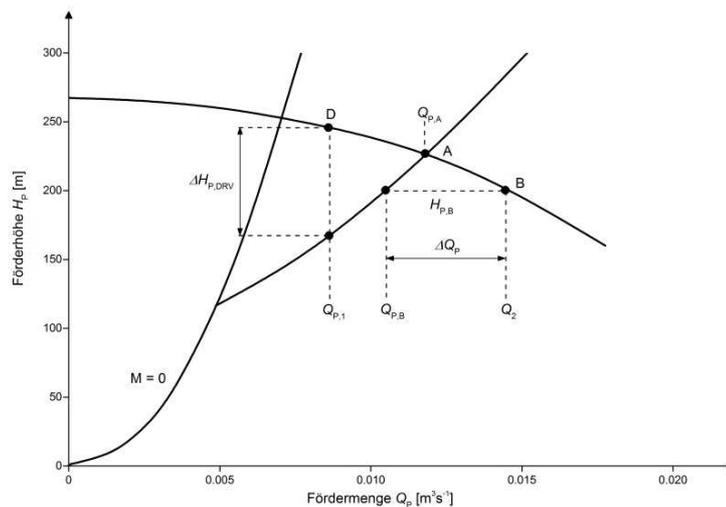


Abbildung 3.12: Regelung einer PAT durch Drosselung oder Bypassregelung, verändert nach Gülich (2010)

Drehzahlregelung

Die Drehzahlanpassung einer PAT bei konstanter Fallhöhe führt im Fall geringerer (höherer) Drehzahlen zu einem höheren (geringeren) Schluckvermögen. Im Hinblick auf eine effiziente Betriebsweise mittels Drehzahlregelung sollte daher der Betrieb im Teillastbereich aufgrund des steilen Wirkungsgradabfalls vermieden werden. Bei steigendem Durchsatz und somit fallender Drehzahl wird schnell die Betriebsgrenze der PAT (ungefähr das 1,5-fache des Durchsatzes Q_{opt} im Bestpunkt) erreicht. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Drehzahlregelung ist daher, dass sich das Wasserdargebot und die jeweilige Fallhöhe so verhalten, dass die Anlage mehrheitlich in der Nähe des Optimums gefahren werden kann. Die wirtschaftlichen Vorteile einer Drehzahlregelung stehen in Abhängigkeit vom gewünschten Regelbereich der PAT sowie vom Abstand der Leerlauf- und Widerstandskennlinie. (Gülich, 2010)

Parallelbetrieb

Ein substantieller Nachteil der PAT-Technologie gegenüber konventionellen Turbinen ist das Fehlen eines Regelapparats zur Justierung der Maschinen im Falle von Abflussveränderungen. Dieser Nachteil kann jedoch durch den modularen bzw. parallelen Aufbau mehrerer Maschinen kompensiert werden, welche individuell an- und abgeschaltet werden können. Somit kann ein breites Abflussspektrum mit hohem Wirkungsgrad bewirtschaftet werden, da die einzelnen

Maschinen zumeist im jeweiligen Nennpunkt betrieben werden (Oberle et al., 2009). Ob der Einsatz baugleicher oder verschiedener Maschinen (bzgl. Schluckvermögen) innerhalb einer Anlage technisch, betrieblich und ökonomisch sinnvoll ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

Generell erfordert der effiziente Betrieb einer PAT weitgehend konstante Betriebsbedingungen wie eine konstante Fallhöhe, da die Wirkungsgradkurve unweit des Optimums im Teillastbereich stark abfällt. Diese Eigenschaft ist von großer Bedeutung, da im Falle von Abflussschwankungen häufiges An- und Abfahren der Maschinen möglichst vermieden werden soll (die mechanische Belastung auf Kreiselpumpen ist bei Start- und Stoppvorgängen sowohl im Pumpen- als auch im Turbinenmodus höher als im Dauerbetrieb). Dies hat somit direkten Einfluss auf die Maschinenauswahl und -dimensionierung sowie auf die Wahl des Regelungskonzeptes. Da die Wahl des Betriebskonzeptes bzw. des Automatisierungsgrades die Komplexität des Systems und somit den technischen und wirtschaftlichen Aufwand für Betrieb und Wartung festlegt, muss im Hinblick auf die Anwendung in Schwellen- und Entwicklungsländern sorgfältig abgewogen werden, welches Konzept unter den jeweiligen Bedingungen handhabbar ist.

Maschinenmodifikation

Das Laufrad einer Kreiselpumpe ist nicht für den Turbinenbetrieb konzipiert, kann jedoch für den inversen Betrieb durch entsprechende hydraulische Auslegung sowie durch mechanische Modifizierung optimiert werden. Beispielsweise kann durch Abrunden der produktionsbedingt überdrehten und scharfkantigen Eintrittskanten (bezogen auf den Turbinenbetrieb) sowie der Deckscheibenkanten eine Reduktion von Ablösungen und Stoßverlusten im Turbinenbetrieb und somit eine Erhöhung des Wirkungsgrades im Bestpunkt erzielt werden. Im Teillastbetrieb führt das Abrunden durch eine Reduzierung von Stoßverlusten zu noch deutlicheren Wirkungsgradsteigerungen. Das Abdrehen (Verkleinern des Laufraddurchmessers) des Laufrades, das im Pumpenbetrieb eine deutliche Reduktion von Förderhöhe und Leistungsaufnahme zur Folge hat, ändert die Turbinenkennlinie nur geringfügig. Dennoch kann durch diese Art der mechanischen Bearbeitung das Betriebsverhalten der Strömungsmaschine im Teillastbereich verbessert werden. Durch Zurückschneiden der Laufradbeschaufelung am Austritt der Turbine kann eine Vergrößerung des Austrittsquerschnitts sowie ein Abflachen der Maschinenkennlinie erzielt werden. Das Zuschärfen der Eintrittskante der Laufradbeschaufelung ermöglicht hingegen eine Verschiebung des Punktes stoßfreien Eintritts zu höheren Durchsätzen. Eine weitere Steigerung des maschinenspezifischen Wirkungsgrades kann durch mechanische Glättung der strömungsführenden Oberflächen erzielt werden. (Gülich, 2010)

Bei der Auslegung einer PAT wird durch das generell ungünstige Teillastverhalten – steiler Abfall der Wirkungsgradkurve bei abnehmenden Durchsätzen – der Bestpunkt leicht in den Überlastbereich verschoben (Gülich, 2010). Für $Q_T > Q_{T,opt}$ verläuft die Wirkungsgradkurve hingegen eher flach, weshalb die Maschine nicht überdimensioniert werden sollte (Gülich, 2010). Grundsätzlich liegt der Bestpunkt im Turbinenbetrieb bei einem um etwa 30 bis 40 % höheren Druckniveau als im Pumpenbetrieb, d.h. der Betrieb einer PAT bei optimalen Bedingungen geht mit einem deutlich höheren Durchsatz einher (Oberle et al., 2009). Im Rahmen der Maschinenauslegung für den Turbinenbetrieb müssen daher entsprechend höhere mechanische und hydraulische Lasten angesetzt werden, um eine ausreichende Betriebssicherheit gewährleisten zu können – dies führt ggf. zum Austausch von Dichtungen usw. durch Bauteile, die einer höheren Belastung standhalten können (Oberle et al., 2009).

Im Hinblick auf die Optimierung von Kreiselpumpen für den inversen Betrieb wurden im Rahmen einer Dissertation (Singh, 2005) umfassende experimentelle Untersuchungen am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. Hierbei wurden im Wesentlichen die Auswirkungen zweier unterschiedlicher Ansätze zur Einflussnahme auf das Betriebsverhalten verschiedener PAT-Bauarten untersucht.

Ein Ansatz befasst sich mit der so genannten „*percentage analysis*“, einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode zur Beurteilung der Signifikanz von Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf die Reduzierung innerer hydraulischer Verluste. Dabei wurde mittels umfassender Versuchsreihen Kavitationsphänomene in invers betriebenen Kreiselpumpen untersucht und darauf aufbauend eine alternative Methodik erarbeitet, die mithilfe der dimensionslosen Kenngröße „*combined suction head number*“ eine Beschreibung des Kavitationsverhaltens einer PAT ermöglicht. Ein zweiter Ansatz dieser Dissertation legte den Fokus auf die Analyse des Gesamtsystems. Das Ziel bei der Anwendung der hierfür entwickelten Methodik ist die Auswahl der am besten geeigneten PAT für einen konkreten Anwendungsfall. Die Basis für die Methodenentwicklung stellten experimentell ermittelte Daten dar, die durch Prüfstandläufe verschiedener Pumpenbauarten gewonnen wurden. (Singh, 2005)

3.4.3 PAT-Technologie vs. konventionelle Wasserturbinen

Technische und betriebliche Eigenschaften

Zuvor wurde bereits mehrfach der Vergleich einer PAT mit konventionellen Turbinen hinsichtlich ihrer technischen, betrieblichen und ökonomischen Eigenschaften herangezogen. Eine der hervorstechendsten Eigenschaften einer PAT ist die im Vergleich zur Turbine einfache Bauart, welche durch das Fehlen eines verstellbaren Leitapparats sowie einer Einrichtung zur Laufradregelung bedingt ist. Einerseits führt die daraus resultierende geringe Komplexität zu einem vergleichsweise niedrigen Betriebs- und Wartungsaufwand. Andererseits hat die geringere Komplexität und fehlende Regelbarkeit einen i.d.R. geringeren Spitzenwirkungsgrad sowie einen steilen Wirkungsgradabfall im Teillastbereich zur Folge. Aus diesem Grund sind für den effizienten Betrieb einer PAT Vorkehrungen zu treffen, welche die Gewährleistung von weitestgehend konstanten Betriebsbedingungen ermöglichen.

Gerade im Hinblick auf das in der vorliegenden Dissertation behandelte Thema spielt die Handhabbarkeit bzw. Anwendbarkeit einer Technologie eine zentrale Rolle für deren nachhaltigen Betrieb. Vor diesem Hintergrund gilt es bei der Wahl zwischen einer konventionellen Wasserturbine und einer PAT abzuwägen, ob aus Effizienzgründen die Turbine oder aus Handhabbarkeitsgründen die PAT zum Einsatz kommen soll. Denn die hohe Komplexität der Turbine kann dazu führen, dass lokales Betriebspersonal in Schwellen- und Entwicklungsländern mit geringem Bildungsstand bei Betrieb und Wartung der Maschine überfordert ist und somit kein nachhaltiger Betrieb gewährleistet werden kann. In diesem Fall stellt die effizienzbezogene Überlegenheit der Turbine keinen realen Vorteil gegenüber einer PAT dar.

Beschaffung und Wirtschaftlichkeit

Der Einsatz der PAT-Technologie ist vorteilhaft, da eine Vielzahl an Pumpen in verschiedensten Bauformen und -größen hergestellt werden und weltweit verfügbar sind. Dieser Vorteil betrifft gleichermaßen die Verfügbarkeit einzelner Komponenten, welche bspw. in verschiedenen Werkstoffausführungen bezogen werden können (z.B. Dichtungen, Lager usw.).

Hingegen werden herkömmliche Turbinen i.d.R. speziell für einen Anwendungsfall konstruiert und produziert, wodurch die Bereitstellung mit einem deutlich höheren Aufwand und letztlich mit deutlich höheren Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten als bei einer PAT verbunden ist. Die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage kann jedoch aufgrund des höheren Wirkungsgrads von Wasserturbinen und der damit einhergehenden höheren Energiegewinnung zugunsten der konventionellen Technologie entschieden werden.

Potentielle Einsatzbereiche invers betriebener Pumpen

Invers betriebene Pumpen werden vorwiegend zur Energierückgewinnung eingesetzt, d.h. sofern es in einem technischen System ungenutzte Druckdifferenzen oder Fallhöhen in Verbindung mit nutzbaren Durchflussmengen gibt, bieten sich potentielle Anwendungsbereiche (KSB AG, 2012). Hierbei kommt der Kostenvorteil einer PAT zum Tragen, da für eine derartige Anwendung die Anschaffung einer konventionellen Turbine i.d.R. nicht wirtschaftlich ist und sich die PAT-gestützte Lösung innerhalb kurzer Zeit amortisieren kann.

DVGW (1994) zufolge kann die Energierückgewinnung mittels PAT bei einer Restenergiemenge von 30 bis 400 kW wirtschaftlich betrieben werden. Liegt der geplante Standort in einer Region mit schwach ausgeprägter Infrastruktur ohne Stromnetz, können auch Anlagen mit Leistungen kleiner 30 kW sinnvoll sein, da die Mehrkosten eines Netzanschlusses einer Alternativlösung entgegenstehen würden. Auch können Anlagen mit Leistungen größer 400 kW realisiert werden, sofern die Betriebsbedingungen nahezu konstant gehalten werden können. Die erforderliche Mindestleistung ergibt sich aus einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Berücksichtigung der projektierten Laufzeit der Anlage. Gängige Anwendungsbeispiele für PAT-basierte Anlagen sind:

- **In Trinkwassernetzen:** PAT-gestützte Anlagen zur Energierückgewinnung in Trinkwassernetzen eignen sich insbesondere an Behältereinläufen, wenn ihnen Wasser aus angrenzenden Hochbehältern oder Hochzonen zuströmt (KSB AG, 2012).
- **Zur Restwassernutzung:** In Grundablässen von Talsperren können invers betriebene Pumpen zur Nutzung der andernfalls dissipierten Energiemenge des durchströmenden Wassers eingesetzt werden (KSB AG, 2012).
- **Retrofit von Kleinwasserkraftanlagen:** Bei Kleinwasserkraftanlagen mit geringem Wasserkraftpotential können die erforderlichen Investitionskosten für eine konventionelle Turbine dem wirtschaftlichen Betrieb entgegenstehen; ggf. kann jedoch die Nutzung einer PAT zur Energiegewinnung sinnvoll sein (KSB AG, 2012).
- **Industrielle Anwendung:** Insbesondere im Kraftwerksbereich gibt es eine Vielzahl von Prozessen, in denen das Prozessmedium überschüssige Druckenergie enthält und aus technischen und/oder Sicherheitsgründen entspannt werden muss. Dabei kann die entnommene Energiemenge entweder dissipiert oder über einen PAT-basierten Sekundärprozess rückgewonnen werden. (KSB AG, 2012)
- **Als Antriebsaggregat für Wasserfördersysteme:** Eine PAT kann als Antriebsaggregat für Kreiselpumpen und somit für Wasserfördersysteme eingesetzt werden. Vorteile ergeben sich dabei insbesondere durch die effiziente da direkte, mechanische Energieübertragung zwischen Kraft- und Arbeitsmaschine, durch die damit verbundene geringe Systemkomplexität und das hohe Potential für (dezentrale) Anwendungen.

Der letztgenannte Anwendungsfall für invers betriebene Kreiselpumpen wird im Weiteren eingehend diskutiert und aus technischer und wirtschaftlicher Sicht mit konventionellen Antriebskonzepten für Wasserfördersysteme verglichen.

3.5 Antriebe von Wasserfördersystemen

Für den Antrieb eines Wasserfördersystems bzw. von Pumpen wird letztlich mechanische Energie benötigt. Die erforderliche Antriebsleistung P_{PA} steht dabei in Abhängigkeit von der Fördermenge Q_P , der Förderhöhe H_P sowie dem Wirkungsgrad η_{PA} des Pumpenaggregats.

Die Bereitstellung der Antriebsenergie kann durch direkte mechanische Übertragung von der Primärenergiequelle zum Fördersystem ohne weitere Umwandlungsstufe erfolgen. Kann die Primärenergie nicht oder nur mit unzureichender Effizienz in mechanische Energie überführt werden, so ist mindestens ein zwischengeschalteter Wandlungsprozess erforderlich. In diesem Fall erfolgt i.d.R. die Wandlung der Primärenergie in elektrische Energie, um einen Elektromotor antreiben zu können (Wembacher, 2013). Dies impliziert, dass durch die Wahl der Primärenergiequelle festgelegt wird, ob bzw. wie viele Energiewandlungen im Gesamtprozess erforderlich sind. Im Hinblick auf die nachhaltige Wasserversorgung in schlecht erschlossenen bzw. entlegenen Regionen sind insbesondere Lösungen zur dezentralen Energieerzeugung von großem Interesse, da sie mit vergleichsweise geringem infrastrukturellem Aufwand eine hohe Flexibilität in der Umsetzung ermöglichen. Grundsätzlich können Wembacher (2013) zufolge drei Strategien zur dezentralen Energieversorgung von Pumpsystemen unterschieden werden:

- **Archaische Antriebe:** Der Antrieb erfolgt durch Menschen oder Arbeitstiere.
- **Konventionelle Antriebe:** Der Antrieb erfolgt durch Netzstrombetrieb oder mittels Verbrennungsmotoren, welche direkt mechanisch mit dem Pumpsystem oder mit einer Zwischenstufe, bestehend aus Generator und Elektromotor, gekoppelt sein können.
- **Antriebe mittels erneuerbarer Energien:** Der Antrieb erfolgt durch den Einsatz erneuerbarer Energien (Biomasse, Geothermie, Solarenergie, Wasserkraft, Windkraft), wobei lediglich im Falle der Wind- und Wasserkraft eine direkte mechanische Kopplung von Kraft- und Arbeitsmaschine möglich ist. Alle anderen Energiequellen können lediglich elektrische Energie zum Antrieb eines Elektromotors zur Verfügung stellen.

3.5.1 Archaische Antriebe

Die in konstruktiver und betrieblicher Hinsicht einfachsten Wasserfördersysteme sind diejenigen, die durch menschliche Arbeitskraft angetrieben werden können. Neben dem geringen Komplexitätsgrad ist der Verzicht auf Fremdenergieträger ein weiterer Grund, weshalb diese Systeme über viele Jahrhunderte insbesondere für den dezentralen Einsatz in entlegenen und ländlichen Regionen angewandt wurden. Durch vom Menschen angetriebene Fördersysteme wird ein vornehmlich intermittierender, bedarfsorientierter Betrieb etabliert; eine kontinuierliche Versorgung ist hingegen nur unter hohem personellem Aufwand realisierbar. Aus ökonomischer Sicht eignen sich diese Systeme besonders für finanziell schwache Regionen, da sie i.d.R. geringe Investitionen erfordern. Der hohe Personalaufwand und die damit i.A. verbundenen hohen Betriebskosten werden gerade in Schwellen- und Entwicklungsländern durch das dort übliche Niedriglohnniveau kompensiert.

Ökologisch betrachtet sind diese Fördersysteme von Vorteil, da durch den treib- und betriebsstofffreien Betrieb weder Emissionen erzeugt werden noch die Gefahr von Kontamination des Untergrunds (oder des Grundwassers) besteht. Darüber hinaus führt die bedarfsorientierte Wasserförderung tendenziell zu einem sorgsamem Umgang mit den vorhandenen Ressourcen sowie zu einer Vermeidung von Wasserverschwendung. (Wembacher, 2013)

Dauerhaft kann ein Mensch jedoch lediglich eine Leistung von ca. 75 W aufbringen (Schlichting, 1984), wodurch der Kapazität zur Wasserentnahme enge Grenzen hinsichtlich der realisierbaren Fördermenge und Förderhöhe gesetzt werden. Auch sind derlei Systeme i.d.R. durch einen mittleren bis niedrigen Wirkungsgrad gekennzeichnet. Über die Wasserbereitstellung für den täglichen Bedarf der lokalen Bevölkerung hinaus können somit ggf. noch Kleingewerbe versorgt werden, für die Versorgung der Großindustrie eignen sich diese Lösungsansätze hingegen nicht.

Als Alternative zur menschlichen Antriebskraft können Arbeitstiere zur Wasserförderung eingesetzt werden, da sie eine deutliche höhere Leistungskapazität aufweisen. Als nachteilig erweisen sich hier die Mehrkosten durch die Anschaffung, die Haltung und die Versorgung der Tiere sowie die Berücksichtigung von Tierschutzaspekten in Abhängigkeit von der lokalen Gesetzeslage. Trotz höherer Leistungskapazität im Vergleich zur menschlichen Arbeitskraft ist auch das Förderpotential dieser Systeme stark limitiert, weshalb sie sich nicht für die dauerhafte Versorgung von Bevölkerung und Industrie eignen. (Wembacher, 2013)

3.5.2 Konventionelle Antriebe

In den meisten Anwendungsfällen erfolgt der Antrieb einer Pumpe durch Elektromotoren, da sie bei hohen Wirkungsgraden ein konstantes Drehmoment bzw. bei konstanter Drehzahl eine nahezu gleichbleibende Leistung liefern (Hellmann, 2009). Des Weiteren zeichnen sich Elektromotoren durch eine gute Regel- und Bedienbarkeit aus (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011). Jedoch kann der erforderliche Schutz dieser Maschinen gegen naturräumliche Einflüsse wie bspw. Temperatur-/schwankungen und hohe relative Luftfeuchte mitunter mit schwer zu beherrschenden technischen und somit auch mit hohen finanziellen Ansprüchen verknüpft sein.

Zunächst liegt die Vermutung nahe, dass der hohe Wirkungsgrad sowie der je nach Form der Energieversorgung emissionsfreie Betrieb dieser Antriebsaggregate auch aus ökologischer Sicht zu einer positiven Bewertung führen. Dies muss jedoch im Zusammenhang mit der Art der Erzeugung des elektrischen Stromes gesehen werden, da diese mit erheblicher Emissionsentstehung behaftet sein kann. Beispielsweise basiert die Stromerzeugung in Indonesien zu 95 % auf fossilen Brennstoffen, wodurch die Nachhaltigkeit der elektrischen Energieversorgung deutlich hinterfragt werden muss. D.h. im Falle einer Versorgung durch das Stromnetz erfolgt lediglich eine räumliche Verlagerung des Entstehungsortes der Emissionen, im Falle des Generatorbetriebs eine unmittelbare Umweltbelastung durch entweichende Schadstoffe (Klöpffer und Grahl, 2009). Die Berücksichtigung räumlich differenzierter Einflussfaktoren auf die Entstehung bzw. den Lebensweg eines Produktes ist der Kern so genannter Ökobilanzen (englisch: *Life Cycle Assessment*, LCA). Mithilfe dieser Methode kann der gesamte Lebensweg eines Produktes, einschließlich der Energieversorgung untersucht, bewertet und mit technischen Alternativen verglichen werden (Klöpffer und Grahl, 2009).

Grundsätzlich kann in infrastrukturell schwach erschlossenen Regionen der Anschluss an das Stromnetz – sofern vorhanden – technisch und/oder wirtschaftlich (zu) aufwändig oder in Extremfällen gänzlich unmöglich sein. Auch gilt es zu beachten, dass vor dem Hintergrund der vielerorts steigenden Bevölkerungszahlen in Schwellen- und Entwicklungsländern (siehe Kapitel

2.4.1) mit einer zunehmenden Einschränkung der elektrischen Versorgungssicherheit zu rechnen ist, wodurch sich nicht zu vernachlässigende Standzeiten für ein Wasserfördersystem ergeben können. Nicht zuletzt führt der Bedarf an elektrischer Energie unweigerlich zu einer starken Abhängigkeit der Betriebskosten vom Strompreis (siehe Kapitel 4.11), wodurch die Wirtschaftlichkeit dieses Förderkonzeptes ggf. infrage gestellt werden muss und eine Kalkulation von Projekten mit langer Laufzeit generell deutlich erschwert wird (gtz, 2009a).

Zur Gewährleistung einer nachhaltigen Wasserförderung bzw. der Versorgungssicherheit sollte daher auch im Falle einer Netzstromversorgung des Pumpensystems die Möglichkeit zur Überbrückung eines Stromausfalls durch einen Alternativantrieb gegeben sein; dies wird i.d.R. durch den Einsatz von Dieselgeneratoren als so genannte EStA, Ersatzstromerzeugungsanlage, realisiert (Mutschmann und Stimmelmayr, 2011).

Neben der Stromnetzversorgung stellt die Nutzung von Dieselmotoren eine weitere gängige Methode zur Energiebereitstellung in der Wasserförderung in entlegenen Regionen dar – Benzin- und Gasmotoren kommen eher selten zum Einsatz (Mutschmann und Stimmelmayr, 2011). Dieselmotoren zeichnen sich insbesondere durch schnelle Anfahrvorgänge, günstiges Teillastverhalten sowie durch gute Wirkungsgrade aus (Mutschmann und Stimmelmayr, 2011). Die Kopplung einer Förderpumpe und eines Dieselgenerators kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen (Wembacher, 2013). Entweder wird der Motor direkt mit der Pumpe gekoppelt, was im Gegensatz zum Antrieb mittels Elektromotor zu einem diskontinuierlichen Drehmomentverlauf, jedoch aufgrund des Wegfalls weiterer Energiewandlungsschritte zu einem höheren Wirkungsgrad führt (Mutschmann und Stimmelmayr, 2011). Oder es erfolgt eine Zwischenumwandlung der durch den Motor bereitgestellten mechanischen Energie in elektrischen Strom mittels eines Generators (Wembacher, 2013). Im Hinblick auf einen kontinuierlichen Betrieb erfordert der Einsatz von Dieselgeneratoren zwar keine Netzanbindung, jedoch eine zuverlässige Treibstoffversorgung (Wembacher, 2013). Der Treibstofftransport ist grundsätzlich per Tanklastwagen möglich, erfordert aber ggf. eine infrastrukturelle Anbindung des Anlagenstandortes (Straßenbau), verbunden mit technischem und wirtschaftlichem Mehraufwand. Weiterhin zieht die positive Wirtschaftsentwicklung in Schwellen- und Entwicklungsländern einen stark steigenden Bedarf an Energie bzw. Treibstoffen nach sich, wodurch Versorgungsengpässe nicht ausgeschlossen werden können (gtz, 2009a).

Generell sind auch bei der Dieselmotortechnologie die naturräumlichen Randbedingungen nicht außer Acht zu lassen, da sie maßgeblichen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit sowie auf die Lebensdauer eines Motors haben (z.B. Ausfall durch Überhitzen). Ein weiterer entscheidender Nachteil beim Einsatz von Dieselmotoren ist die Kontaminationsgefahr des Untergrunds bei Kraftstoff- und/oder Ölaustritt. Dieses Gefahrenpotential ist in Gebieten mit hoch-vulnerablen Untergrund – insbesondere in Karstgebieten – nicht zu unterschätzen, da hierdurch eine langanhaltende Beeinträchtigung der (Grund-) Wasserqualität folgen kann (Oberle et al., 2012). Nicht zuletzt steht die Verwendung einer endlichen Ressource wie dem Dieselmotorkraftstoff im Gegensatz zur Forderung nach einer nachhaltigen Energie- und Wasserversorgung.

Die in Bezug auf Dieselmotoren angeführten technischen, infrastrukturellen und logistischen Aspekte gelten auch für Benzin- und Gasmotoren. Im Vergleich zu Dieselmotoren weisen Benzinmotoren einen erhöhten Wartungsaufwand sowie eine geringere Lebensdauer auf, wodurch der Betrieb i.d.R. als deutlich unwirtschaftlicher betrachtet werden kann. Auch beim Einsatz von Gasmotoren gibt es Einschränkungen aus ökonomischer Sicht, da der wirtschaftliche Betrieb aufgrund des schlechten Teillastverhaltens nur bei Vollastbetrieb realisierbar ist.

3.5.3 Antriebe auf Basis erneuerbarer Energien

Grundsätzlich kann die Frage nach der Wahl des am besten geeigneten Primärenergieträgers für ein Wasserfördersystem nicht pauschal beantwortet, sondern muss anwendungsspezifisch entschieden werden. Zwar wird der Einsatz erneuerbarer Energien gemeinhin mit einer nachhaltigen Energieversorgung gleichgesetzt, doch kann der Einsatz dieser Energieformen trotz des möglichen Verzichts auf Netzstrom und fossile Brennstoffe mit zum Teil substantiellen Nachteilen verbunden sein. Nachfolgend werden einzelne Formen erneuerbarer Energien im Hinblick auf die Eignung als Antriebsenergie für Wasserfördersysteme differenziert betrachtet.

3.5.3.1 Biomasse

Die energetische Biomassenutzung erfolgt durch Anwendung verschiedener Umwandlungsprozesse, wobei die verwendbaren Ausgangsstoffe entsprechend der jeweiligen stofflichen und chemischen Eigenschaften in vier Gruppen unterteilt werden können (ölhaltige, zucker- und stärkehaltige, lignin- und cellulosehaltige Biomasse sowie Abfälle und Reststoffe). Jede dieser Gruppen ist mit einem spezifischen Prozess zur Aufbereitung, Konditionierung und Konversion verknüpft. (Wegert und Georgiev, 2012)

Unabhängig von der Komplexität des Systems folgt nach der Aufbereitung der Biomasse i.d.R. eine thermochemische, physikalisch-chemische oder biochemische Wandlung, woraus je nach Prozess ein festes, flüssiges oder gasförmiges Produkt resultiert (Wegert und Georgiev, 2012). Durch die anschließende Verbrennung dieser Produkte wird elektrische oder thermische Energie erzeugt. Im Hinblick auf die Wasserförderung kann die elektrische Energie über einen Elektromotor in mechanische Energie zum Antrieb einer Förderpumpe gewandelt werden. Die thermische Energie kann in der Wasserförderung als Antriebsenergie einer mit einer Förderpumpe gekoppelten Wärmekraftmaschine Verwendung finden. Somit ist sowohl bei der Elektrizitäts- als auch bei der Krafterzeugung die Möglichkeit gegeben, die Bioenergieanlage direkt mit Förderpumpen zu koppeln und das Gesamtsystem somit dezentral zu betreiben. Wie bei jedem Prozess zur Energiegewinnung oder -nutzung entstehen auch in Biokraftwerken Energieverluste bspw. durch Reibung und Abwärme. D.h. die dem Heizwert entsprechende Energiemenge dient als Eingangsgröße für nachfolgende Prozessschritte und wird dem jeweiligen prozessspezifischen Wirkungsgrad entsprechend reduziert. (Kalide und Sigloch, 2010)

Welcher Biokraftwerkstyp Anwendung finden soll hängt stark von den lokalen technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen ab. Moderne, in Industrieländern errichtete Biokraftwerke sind i.A. komplexe und kostenintensive Systeme, wohingegen es auch vergleichsweise einfache, bereits praxiserprobte Alternativen zur Elektrizitätsgewinnung auf Basis von Biokraftstoffen für infrastrukturell schwache Regionen gibt. Neben dem einfachen Aufbau zeichnen sich letztgenannte Systeme durch ein geringeres *Investment*, jedoch gleichzeitig durch eine geringere Lebensdauer und Effizienz aus. (Bücker, 2012)

Zur Abschätzung des erforderlichen *Investments* für den Bau eines Biokraftwerks müssen der Elektrizitätsbedarf evaluiert sowie der Heizwert der verfügbaren Biomasse berücksichtigt werden. Mithilfe dieser Kenngrößen können der bevorzugte Kraftwerkstyp, die Leistungsklasse sowie die spezifischen Investitionskosten des Biokraftwerks berechnet werden. Generell ist das leistungsabhängige *Investment* einer Degression unterworfen, weshalb bei geringerer Leistung ein höheres spezifisches *Investment* erforderlich ist (bspw. liegen die Anschaffungskosten bei einer 75kW-Anlage um das Doppelte höher als bei einer 500kW-Anlage) (FNR, 2012).

Den vorausgehenden Ausführungen zufolge eignet sich die energetische Biomassenutzung grundsätzlich für den Einsatz in stark ländlich geprägten bzw. entlegenen Regionen, da diese i.d.R. einen hohen Anteil an landwirtschaftlicher Produktion aufweisen. Zwar können neben dem gezielten Anbau von Biomasse auch Abfälle aus der Nahrungsmittel- oder Futtermittelproduktion zur Energiegewinnung verwendet werden (FNR, 2012). Jedoch setzen die zugehörigen Prozesse eine nicht zu vernachlässigende Menge an Primärenergieträgern sowie der u.U. ohnehin knappen Wasserressourcen voraus. In Regionen mit geringem landwirtschaftlichem Ertrag können diese Mengen mitunter nicht oder nur unter erheblichem Aufwand bereitgestellt werden.

Die technische und wirtschaftliche Effizienz sowie die Leistungskapazität eines Biokraftwerks hängen daher maßgeblich von Art und Menge der verfügbaren Biomasse ab (i.A. können bei der Verbrennung von auf Biomasse basierenden Flüssigbrennstoffen deutlich höhere Energiemengen erzielt werden als bei der Verwendung von Feststoffen wie Rückständen oder Energiepflanzen) (FNR, 2012). Im Hinblick auf Dürren, Überschwemmungen oder anderweitige Naturkatastrophen ist die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Biomasse ein weiterer Aspekt, welcher dem nachhaltigen Antrieb eines Wasserfördersystems entgegensteht.

3.5.3.2 Geothermie

Der Untergrund eignet sich auf vielfältige Weise für die thermische Nutzung seiner Energieressourcen im Niedertemperaturbereich, ob als Wärmequelle, Wärmesenke oder als thermischer Speicher (VDI, 2010). Insbesondere das große erschließbare Speichervolumen sowie die ständige Verfügbarkeit der Ressourcen sind hierbei vorteilhaft. I.A. wird die Erdwärme mittels horizontal oder vertikal implementierter Wärmeübertrager oder über das gezielte Abpumpen von Grundwasser gewonnen (VDI, 2010). Hierbei gilt, dass weltweit von der Erdoberfläche ausgehend ein Anstieg der Temperatur mit zunehmender Tiefe zu verzeichnen ist, welcher im Mittel ca. 30°C je 1000 m beträgt (Rogge, 2004). Dieser Wert alleine bietet allerdings noch keine Aussagekraft in Bezug auf die Eignung geothermischer Ressourcen (BMU, 2011). Für eine vollständige Analyse einer potentiellen geothermischen Nutzungsstätte sind daher weiterhin Kenntnisse der hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds wie bspw. die Permeabilität des Gesteins unverzichtbar (BMU, 2011). Die hydraulischen sowie die thermophysikalischen Eigenschaften werden demnach maßgeblich durch die jeweilige geologische Formation beeinflusst und sind somit stark standortabhängig (BMU, 2011).

Soll eine geothermische Anlage zur Elektrizitätserzeugung verwendet werden, ist die Erschließung einer Energiequelle mit ausreichend hoher Temperatur erforderlich. Hierbei kommen i.d.R. sogenannte offene Systeme zum Einsatz, da in diesem Fall das Fluid der geothermischen Quelle selbst zur Wärmeübertragung genutzt wird und somit höhere Temperaturen und eine höhere thermische Leistung erzielt werden können. Im Vergleich: Geschlossene Systeme sind nach heutigem Stand der Technik in ihrer Leistung limitiert, da die Wärmeübertragungsfläche im Vergleich zu offenen Systemen klein ist und eine Tiefenbohrung mit hohem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden ist. (BMU, 2011)

Da bei der Nutzung geothermaler Ressourcen die Effizienz und Leistungskapazität einer Anlage von der Temperatur abhängen, sind bei dem o.g. mittleren Temperaturanstieg möglichst tiefe Bohrungen wünschenswert (BMU, 2011). Die zunehmende Bohrlochtiefe korreliert jedoch mit stark progressivem technischem und finanziellem Aufwand (Rogge, 2004). Selbst Nutzungsstätten, die bereits bei vergleichsweise geringer Tiefe geeignete Bedingungen zur geothermalen Energiegewinnung bieten, erfordern zur Elektrizitätsgewinnung eine Teufe von

mehreren hundert Metern, verbunden mit mittleren sechsstelligen Investitionsbeträgen in Euro (Rogge, 2004). Aufgrund der beschriebenen technischen und finanziellen Herausforderungen erscheint die Nutzung geothermaler Ressourcen zur dezentralen Energieversorgung für die Wasserförderung in Schwellen- oder Entwicklungsländern daher als nicht geeignet.

3.5.3.3 Solarenergie

Die Nutzung von Solarenergie mithilfe von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) ist eine attraktive Option für die dezentrale Elektrizitätsgewinnung in entlegenen Regionen. Insbesondere bei Anwendungen in Schwellen- und Entwicklungsländern gelten solarstrombetriebene Pumpenanlagen im Inselbetrieb bereits heute als kosteneffektive Lösung bei Förderleistungen bis ca. 10 kW (Schumacher Center, 2010). Für gewöhnlich gilt deren Einsatz der Versorgung entlegener Siedlungen sowie zur landwirtschaftlichen Nutzung (Bewässerungsfeldbau, Viehzucht).

Auch in Deutschland finden PV-Anlagen vielerorts Anwendung, wobei mehr als 98 % der Anlagen an das dezentrale Niederspannungsnetz angeschlossen sind (Fraunhofer ISE, 2013). Zwar können die hierbei verwendeten Systeme die Elektrizitätserzeugung ohne weiteren Umwandelungsschritt realisieren, jedoch erfordert dies eine ausreichende Einstrahlungsintensität und -dauer für einen technisch und wirtschaftlich sinnvollen Betrieb (Wembacher, 2013). Standortunabhängig kann durch die ideale Ausrichtung der Module, ggf. durch eine elektrische Nachführung (Positionsveränderung in Abhängigkeit vom Tagesgang der Sonne), das Leistungspotential einer Photovoltaikanlage zwar erhöht werden, jedoch nur mit erheblichem technischem und wirtschaftlichem Aufwand (Fraunhofer ISE, 2013). Dieser häufig vermiedene Mehraufwand in Verbindung mit starken jahreszeitlichen Schwankungen des Einstrahlwinkels führt in Deutschland dazu, dass die installierten Photovoltaikanlagen die geringste Volllaststundenzahl aller Erneuerbaren Energien aufweisen (Fraunhofer ISE, 2013).

Selbst im Falle einer ausreichenden Globalstrahlung gilt es zu berücksichtigen, dass eine Versorgung rund um die Uhr nur mit kostenintensiven Energiespeichern mit ausreichender Kapazität möglich ist. Hierbei sind sowohl Batteriepuffer für kurz- bzw. mittelfristigen Ausgleich von Spannungsschwankungen sowie der Einsatz von Wasser-/Verteilspeichern erforderlich. So kann bei ausreichender Strahlungsintensität mehr Wasser gefördert und in den genannten Bauwerken zwischengespeichert werden.

Spannungsschwankungen sind infolge wechselhafter Witterung zu erwarten, da das volle Leistungspotential einer PV-Anlage lediglich bei maximaler Strahlungsintensität voll ausgeschöpft werden kann. Unterschreitet die Versorgungsspannung einen kritischen Wert, so kann der Betrieb der Förderpumpe nicht aufrechterhalten werden. Erfolgt die Energieversorgung einer Wasserförderanlage über ein PV-System ohne jeglichen Batteriespeicher, so sind DIN VDE 0530-1 (gilt für die Auslegung und den Betrieb drehender elektrischer Maschinen) zufolge je nach Art des Elektromotors lediglich Spannungsschwankungen von $\pm 5\%$ bis $\pm 7,5\%$ zulässig (Fischer, 2013). Eine dauerhafte Über- bzw. Unterschreitung dieser Grenzwerte ist lt. Norm nicht zulässig, da sich die Betriebspunkte des Elektromotors sowie der angeschlossenen Arbeitsmaschine verschieben und Maschinenschäden nicht zuverlässig ausgeschlossen werden können. Somit ist wie oben beschrieben die Integration eines Batteriespeichers für den Ausgleich kurzzeitiger Spannungsschwankungen über die o.g. Grenzwerte hinaus unumgänglich.

Dies betrifft insbesondere sogenannte *Off-grid*-Systeme, welche als denztrales System (Inselssystem) ohne Anschluss an ein Stromnetz beschrieben werden können. Durch den fehlenden Stromnetzanschluss können diese Spannungsschwankungen nicht ausgeglichen

werden. Mithilfe gängiger Batterietypen auf Blei- oder Lithium-Ionen-Basis kann jedoch ein Batteriespeicher mit geringer Kapazität integriert werden, um im Fall anhaltend ungünstiger Witterungsverhältnisse die Anlage kontrolliert abschalten zu können. Der Einsatz von Speichern mit höherer Kapazität ermöglicht zwar das Puffern längerer Zeiträume mit verringerter Einstrahlung, jedoch ist dieses Konzept je nach Speichergröße mit hohen Investitionen verknüpft, welche die Wirtschaftlichkeit der Anlage infrage stellen können. (Weniger et al., 2015)

Ein substantieller Nachteil beim Einsatz eines Batteriespeichers ist die damit einhergehende Erhöhung der Komplexität des Regelungssystems (Zu- und Abschalten des Batteriespeichers erfolgt eigenständig durch das Regelungssystem). Anhand der Erfahrungen des IWRM-Verbundvorhabens kann jedoch gezeigt werden, dass an entlegenen, schlecht erschlossenen Standorten die Beherrschbarkeit einer hochautomatisierten elektrotechnischen Regelungseinrichtung nicht oder nur eingeschränkt gegeben ist (Oberle et al., 2012). Weiterhin ist bei flachem Aufstellwinkel der Module – wie es beispielsweise in Äquatornähe aufgrund der nahezu senkrechten Sonneneinstrahlung erforderlich wäre – die Verschmutzung ein großes Problem, da die Leistung der PV-Anlage überproportional zur verschmutzten Fläche zurückgeht und somit der Wartung eine große Bedeutung zukommt (Fraunhofer ISE, 2013).

Aufgrund der genannten Unsicherheiten hinsichtlich der Energieversorgung werden Weniger et al. (2015) zufolge PV-Systeme mit Leistungen über 100 kW bislang ausschließlich als *On-grid*-Anwendungen (englisch: an ein Stromnetz angeschlossen) realisiert (Stand August 2015).

Bei *On-grid*-Systemen wird der Anschluss an ein bestehendes Stromnetz genutzt, um im Falle eines Energieüberschusses Strom von der PV-Anlage in das Netz einzuspeisen; bei einer Unterversorgung wird zur Gewährleistung des kontinuierlichen Betriebs der Pumpanlage Energie aus dem Netz entnommen. Vergleichbar zu *Off-grid*-Anlagen mit Batteriespeicher ist jedoch auch dieses Versorgungskonzept mit einem deutlich höheren Automatisierungsgrad und letztlich mit einer hohen, schwer handhabbaren Systemkomplexität verknüpft.

Neben den resultierenden betrieblichen Nachteilen sind im Falle einer *On-grid*-PV-Förderanlage weiterhin Richtlinien und Normen seitens des Gesetzgebers erforderlich, welche u.a. die Abnahmepflichten, Einspeisevergütung sowie Entnahmepreise festlegen, wie es bspw. in Deutschland durch das „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ der Fall ist.

Off-grid-Anlagen für Leistungen über 100 kW befinden sich aktuell im Entwicklungsstadium (Ebaid et al., 2013; Odeh, 2014), wonach die Realisierung einer solchen Anlage bislang nicht bekannt ist. Nicht zuletzt die erhebliche Senkung der Anschaffungskosten für PV-Anlagen, welche sich alleine im Zeitraum 2006 bis 2013 auf ca. 70 % beziffern lässt (EuPD Research, 2013), gab jedoch das Initial zur Entwicklung von PV-basierten Fördersystemen für *Off-grid*-Anwendungen mit Förderleistungen über 10 kW, sodass künftig die PV-Technologie eine aus technischer und wirtschaftlicher Sicht sinnvolle Alternative zur Energieversorgung dezentraler Wasserpördersysteme darstellen kann.

3.5.3.4 Windkraft

Windkraftanlagen werden bereits seit vielen Jahrhunderten u.a. zur Energiebereitstellung für die Wasserpördernutzung genutzt. Konstruktiv besteht eine Windkraftanlage i.d.R. aus einem Rotor, der über eine horizontale Welle mechanische Energie an ein anschließendes System (z.B. Wasserpördersystem) weitergibt oder einen Generator zur Erzeugung elektrischer Energie antreibt. Maßgebliche Bemessungsgröße für Windkraftanlagen ist die Windgeschwindigkeit, da sie in der dritten Potenz in die erzielbare Leistung eingeht (BMU, 2011). So liegt nach heutigem

Stand (August 2015) die Mindestgeschwindigkeit zur Gewährleistung des wirtschaftlichen Betriebs einer Windkraftanlage bei 5 m s^{-1} (Cloutier und Rowley, 2011). Die mittlere Windgeschwindigkeit hängt jedoch u.a. vom Abstand des Rotors zum Boden ab, wodurch die erforderliche Höhe einer Windkraftanlage erheblich von der Standortwahl abhängt.

Grundsätzlich lassen sich in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit vier unterschiedliche Betriebsphasen einer Windkraftanlage definieren. Unterhalb der aus technischer und wirtschaftlicher Sicht festgelegten Mindestgeschwindigkeit von 3 m s^{-1} reicht die Energie nicht aus, um Reibung und Trägheit des Rotors zu überwinden. Oberhalb dieser Geschwindigkeit beginnt der Rotor sich zu drehen. Bei steigender Windgeschwindigkeit nimmt die Anlagenleistung zu, bis die Nennleistung des Systems erreicht wird. Übersteigt die Windgeschwindigkeit die maximal zulässige Geschwindigkeit, muss die Anlage zur Vermeidung von Systemschäden aus Sicherheitsgründen abgeschaltet werden. Moderne Windkraftanlagen sind daher mit einem Regelsystem ausgestattet, mit dessen Hilfe die Effizienz der Anlage durch Anpassung an die bestehenden Windverhältnisse optimiert werden kann. (BMU, 2011)

Analog zu den Ausführungen in Bezug auf PV-gestützte Wasserförderanlagen kann bei windkraftbetriebenen Fördersystemen argumentiert werden, dass die ungleiche und eingeschränkt vorhersagbare Windgeschwindigkeit als Maß für die generierbare Leistung zu planerischen und betrieblichen Unsicherheiten führt. Demzufolge ist auch im Falle der Windkraftnutzung ein Batteriespeicher unerlässlich, woraus sich die o.g. Nachteile ergeben.

Auch ist aufgrund des hohen Reifegrades der eingesetzten Technologien sowie der Begrenzung des maximalen theoretischen Wirkungsgrades bei 59 % keine signifikante Steigerung der heutigen technisch umsetzbaren Spitzenwirkungsgrade von ca. 50 % zu erwarten (BMU, 2011). Im Hinblick auf die Wasserförderung bietet die Windkraftnutzung zwar die Möglichkeit einer brennstoff- und emissionsfreien Energiebereitstellung, jedoch nur mit bedingt planbaren Nutzungszyklen (vergleichbar mit den Einschränkungen von PV-anlagen) (Wembacher, 2013).

3.5.3.5 Wasserkraft

Gemäß den vorausgegangenen Kapiteln erfolgt die Nutzung eines Wasserkraftpotentials durch den Einsatz einer Wasserkraftmaschine, welche die Druckenergie des Wassers in mechanische Energie wandelt. Weltweit ist eine Vielzahl von Wasserkraftmaschinen unterschiedlicher Leistungsklassen verfügbar, weshalb u.a. auch die (dezentrale) Nutzung kleinster Wasserkraftpotentiale realisiert werden kann (BMU, 2011). Beeinflussende technische Faktoren für Planung und Bau einer Wasserkraftanlage sind das Wasserdargebot bzw. dessen jahreszeitliche Schwankungen sowie die nutzbare Fallhöhe des Gewässers. Das Produkt dieser Größen ist ein Maß der nutzbaren Energie an einem bestimmten Standort.

Bereits seit vielen Jahrhunderten werden verschiedene Konzepte zur Energiegewinnung durch Wasserkraft genutzt. Aufgrund des großen Erfahrungsschatzes gelten die zugehörigen Technologien heute als technisch ausgereift. Somit sind künftig bei vielen Anwendungen nur noch geringe Kostensenkungen zu erwarten, da das Optimierungs- bzw. Einsparpotential aufgrund des hohen Reifegrades der Wasserkrafttechnologien als weitgehend erschöpft angesehen werden kann (BMU, 2011). Dies gilt jedoch insbesondere für Großanlagen mit einer installierten Leistung von $> 1 \text{ MW}$, in denen konventionelle Wasserturbinen eingesetzt werden.

Gerade bei der dezentralen Wasserkraftnutzung mit Klein- ($< 10 \text{ MW}$) und Kleinstkraftwerken ($< 1 \text{ MW}$) gibt es hingegen noch immer großen Entwicklungsbedarf, da insbesondere für die Anwendung in entlegenen bzw. stark ländlich geprägten, infrastrukturell schlecht erschlossenen

Regionen angepasste Technologien erforderlich sind, um deren nachhaltige Nutzung gewährleisten zu können. Erhebliches Wasserkraftpotential besteht vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern Süd- und Zentralamerikas, Asiens, Lateinamerikas und Afrikas. Dabei spielen vor allem die o.g. Klein- und Kleinstwasserkraftwerke eine maßgebende Rolle. So hat bspw. China seit 1993 Investitionen von mehr als 1,3 Billionen US-Dollar geleistet für den Bau von Kleinstwasserkraftwerken. Hierdurch wurden bis ins Jahr 2011 43.000 Kleinstwasserkraftwerke errichtet (ECN, 2003). Weitere Schwellen- und Entwicklungsländer mit signifikanter Kapazität an Kleinstwasserkraft sind Indien (1.694 MW), Brasilien (859 MW), Peru (215 MW), Malaysia und Pakistan (beide 107 MW), Bolivien (104 MW), Dem. Rep. Kongo (65 MW) und Sri Lanka (35 MW) und Papua New Guinea (20 MW).

Unabhängig von der Leistungsklasse wird i.d.R. die dem Wasser entzogene Energie mechanisch an einen Generator zur Elektrizitätserzeugung übertragen. Im Hinblick auf die Wasserpumpung kann die Wasserkraftmaschine jedoch auch direkt mechanisch mit der Arbeits- bzw. Fördermaschine verbunden werden, wodurch sich erhebliche technische und wirtschaftliche Vorteile ergeben (Oberle et al., 2012). Hierdurch werden insbesondere die Systemkomplexität sowie die erforderlichen Investitionskosten signifikant reduziert, wodurch nicht zuletzt die Handhabbarkeit durch Menschen mit geringem technischem Bildungsstand deutlich erhöht wird. Unabhängig von der Art der Energieübertragung (Generator und Elektromotor oder direkte mechanische Übertragung) ist bei der dezentralen Nutzung von Wasserkraft zur Wasserpumpung eine infrastrukturelle Anbindung der Anlage nicht zwingend erforderlich.

Das erforderliche *Investment* wird primär von den lokalen topografischen und hydrogeologischen Randbedingungen sowie vom Entwicklungsstand und der Beschaffungssituation in der Zielregion geprägt. Generell liegen die leistungsabhängigen Investitionskosten von Kleinstwasserkraftanlagen zwar auf einem vergleichsweise hohen Niveau (BMU, 2011). Jedoch können diese erfahrungsgemäß bei zu erwartenden Laufzeiten von bis zu 50 Jahren aufgrund der i.d.R. geringen Betriebs- und Wartungskosten kompensiert werden.

3.5.4 Antrieb durch invers betriebene Kreiselpumpen

Ein wesentlicher Aspekt, der im Hinblick auf die Nutzung erneuerbarer Energien berücksichtigt werden muss, ist das häufig fehlende *Knowhow* für Entwicklung, Implementierung und Instandhaltung im Vergleich zu etablierten Arten der Energiegewinnung. Hierbei ist grundsätzlich ein umfassendes Engagement seitens der Regierung des betroffenen Landes gefragt, um mittels Schulungsprogrammen usw. Techniker für diese Aufgaben auszubilden (IEA, 2008). Darüber hinaus wird empfohlen durch den Gesetzgeber Anreize für die Industrie zu setzen, um im Bereich erneuerbarer Energien Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie weitreichende *Clean-Development-Mechanism-Projekte* (CDM) zu fördern und somit eine langfristige Perspektive zu schaffen (IEA, 2008). Die Relevanz dieser Konzepte wird durch eine Studie der Weltbank (2007) verdeutlicht, wonach Indonesien ein defizitärer Energiemarkt sowie trotz der geringen Wirtschaftsleistung der dritte Rang unter den größten Emittenten von Treibhausgasen weltweit bescheinigt wurde. Das Bewusstsein für diesen Sachverhalt ist jedoch (noch) nicht in der Bevölkerung angekommen.

Vor diesem Hintergrund sind Konzepte von entscheidender Bedeutung, welche eine dezentrale, umweltverträgliche, technisch angepasste und nach Möglichkeit wirtschaftlich tragbare Energieversorgung ermöglichen. Bei der Solar-, Geothermie-, Biomasse- und Windenergienutzung ergeben sich jedoch substantielle Nachteile aufgrund der i.d.R.

erforderlichen Wandlung der Primärenergie in elektrische Energie sowie durch die starke Abhängigkeit von äußeren Einflussfaktoren wie bspw. der Sonnenscheindauer oder Windstärke (im Hinblick auf das standort- und jahreszeitabhängige Wasserdargebot gilt letztgenannter Aspekt natürlich auch für die Wasserkraftnutzung). Jede zusätzliche Energiewandlung indes führt zu einer erhöhten Komplexität des Gesamtsystems, was eine Einschränkung der Handhabbarkeit zur Folge haben kann sowie zu einer Reduzierung der Effizienz durch zusätzliche Verlustquellen führt. Einzig im Falle der Wasserkraftnutzung kann eine direkte mechanische Übertragung der gewonnenen Energie auf die Förderpumpe(en) erfolgen (bei der Windkraftnutzung ist dies bedingt möglich in Abhängigkeit von Aufstellungsort und -höhe der Windkraftanlage), wodurch ein effektives System mit relativ geringer Komplexität realisiert werden kann.

In diesem Zusammenhang bietet die direkte mechanische Kopplung einer invers betriebenen Pumpe mit einer Förderpumpe enormes Anwendungspotential für entlegene und schlecht erschlossene Standorte. In diesem Zusammenhang wurden im Rahmen der F&E-Aktivitäten des IWG in Südostasien in Kooperation mit dem Industriepartner KSB AG Frankental sogenannte „Fördermodule“ als mechanische Einheit aus PAT, Getriebe zur Drehzahlübersetzung²⁰ und Kreiselpumpe im Regelbetrieb zur Wasserförderung entwickelt und in der Modellregion *Gunung Kidul* erstmalig implementiert (Oberle et al., 2009). Vorteile durch die Nutzung einer PAT als Antriebsaggregat eines Fördermoduls ergeben sich vornehmlich durch die nachfolgenden Eigenschaften, wonach sich die anschließenden Ausführungen in der vorliegenden Arbeit ausschließlich auf WPS beziehen.

- Die geringe Systemkomplexität und der Verzicht auf oszillierende Bauteile führen zu hoher Robustheit und ermöglichen eine hohe Effizienz, da auf verlustbehaftete Zwischenstufen wie Generatoren und Elektromotoren verzichtet werden kann. Weiterhin geht beim Direktantrieb einer Pumpe durch eine Wasserkraftmaschine die Energiebilanz der beiden Maschinen auf, d.h. die dem Wasser entnommene Energiemenge wird vollständig für den Antrieb der Pumpe sowie zur Kompensation der dissipativen Verluste des Gesamtsystems durch Abwärme, Reibung usw. aufgewandt (Fritz et al., 2012).
- Das Konzept, mittels PAT eine Förderpumpe anzutreiben, bietet aufgrund der Vielzahl einsetzbarer Maschinen eine hohe Adaptierbarkeit für vielfältige Betriebsbedingungen. Definitionsgemäß wird *„von Adaptierbarkeit [...] gesprochen, wenn durch externe Eingriffe Einstellungen [...] angepasst werden können“* (Miller, 2005) – demzufolge bezieht sich dieser Begriff auch auf die Möglichkeit eines modularen Aufbaus des gesamten Fördersystems, um im Falle hoher Abflussschwankungen ein größeres Abflussspektrum zu verarbeiten. Durch diesen modularen Aufbau kann der Nachteil der fehlenden Regelbarkeit einer PAT kompensiert werden (siehe Kapitel 3.4.2).
- Ist für den Auslegungsprozess lediglich eine unzureichende Datengrundlage verfügbar, so bietet das modulare Konzept die Möglichkeit zur nachträglichen Anpassung auf Basis der im Betrieb gewonnenen Erkenntnisse. Diese Anpassungen können als Austausch einzelner Maschinen/Module sowie durch Installation weiterer Module realisiert werden.
- Der Verzicht auf Treib- und Brennstoffe ist aus ökonomischer (geringere Betriebskosten) und ökologischer Sicht (emissionsfreier Betrieb) vorteilhaft.

²⁰ Bei dieser Anwendung war der Einsatz eines Getriebes erforderlich, diese Notwendigkeit muss jedoch an anderen Standorten nicht gegeben sein

Die beschriebenen Eigenschaften eines WPS lassen sich durch die in Abbildung 3.13 genannten Attribute zusammenfassen. Die Auswahl sowie die Gewichtung dieser Eigenschaften wurde auf Basis der in der Pilotanlage *Bribin* gewonnenen Erkenntnisse (siehe Kapitel 4) gewählt.

Die Adaptierbarkeit ist an erster Stelle genannt, da sie den grundlegenden Sinn einer „angepassten Technologie“ widerspiegelt. Diesem Anspruch entsprechen WPS, da sie sich durch eine hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Standortbedingungen auszeichnen. Auch die an zweiter Stelle genannte Adaptivität sowie die Handhabbarkeit durch lokale Betreiber kann durch WPS gewährleistet werden. So erfolgt eine selbstständige Anpassung im Betrieb, wenn bspw. die Fallhöhe verändert wird und die Leistung der PAT zu- bzw. abnimmt; die Handhabbarkeit bezieht sich gleichermaßen auf den Betrieb sowie auf die Wartung, da beides durch lokales (Fach-) Personal erfolgen soll. Die an dritter Stelle aufgeführte Gewährleistung einer dauerhaften Betriebssicherheit und Betriebsfähigkeit steht in direktem Zusammenhang mit der Robustheit und Wartungsfreundlichkeit der eingesetzten Maschinen. Zuletzt wird die Effizienz genannt, da auf Basis der in *Bribin* gewonnenen Erfahrungen ein zuverlässiges System mit geringerem Wirkungsgrad einem hocheffizienten, jedoch anfälligeren System vorgezogen wird.

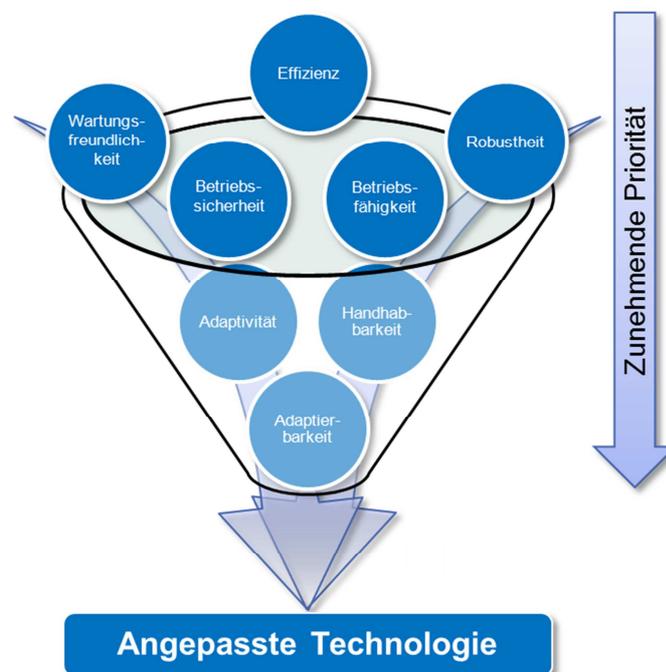


Abbildung 3.13: Maßgebende Eigenschaften angepasster Technologien

3.6 Planungsgrundlagen für WPS (am Beispiel *Bribin*)

Die in Gleichung (3.8) dargestellte Leistungsbilanz zeigt, dass das Schluckvermögen der PAT, die nutzbare Fallhöhe, die zu überwindende Förderhöhe sowie die realisierbare Fördermenge die maßgeblichen Kenngrößen für WPS darstellen. Weicht im Betrieb einer der genannten Parameter vom Nennpunkt ab, so verschiebt sich auch der Betriebspunkt der anderen Maschine durch eine selbstständige Regelung des Fördermoduls. Diese „*Adaptivität meint [...] die selbständige [...] Anpassung des Systems an Inputs*“ (Miller, 2005) und ist ein weiterer entscheidender Vorteil des Wasserförderkonzeptes, da hierdurch geringe Schwankungen der Betriebsbedingungen selbsttätig durch das System reguliert werden und ein Eingriff des Betriebspersonals oder eines automatisierten Regelungssystems nicht erforderlich ist.

$$P_T \eta_{Komp.} = \rho g Q_T H_T \eta_T \eta_{Komp.} = \frac{\rho g Q_P H_P}{\eta_P} = P_{PA} \quad (3.8)$$

Vor diesem Hintergrund werden die für die Auslegung und den Betrieb der Module maßgeblichen Parameter Ausbaudurchfluss Q_A , Fallhöhe H_T , Förderhöhe H_P und Fördermenge Q_P allgemein sowie im Hinblick auf die in Kapitel 2.6.2 vorgestellte Pilotanlage *Bribin* beschrieben.

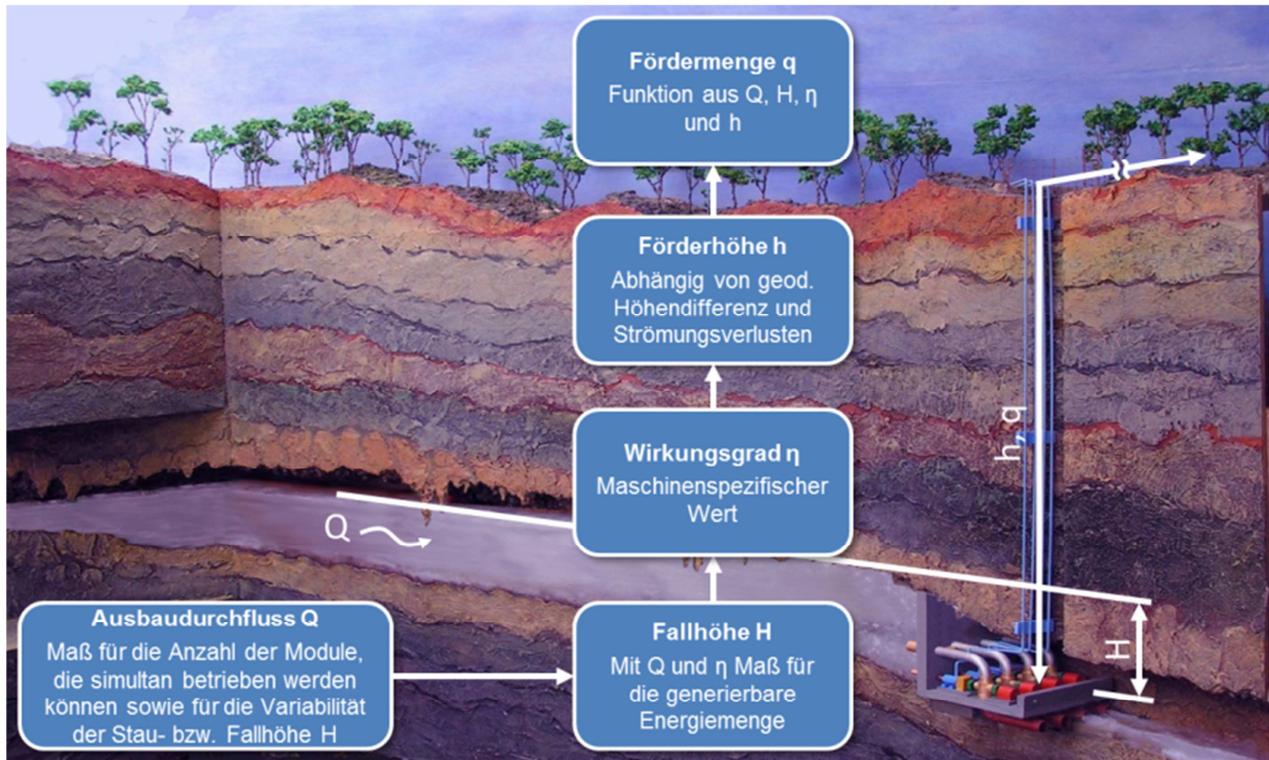


Abbildung 3.14: Übersicht der maßgebenden Auslegungsparameter für WPS am Beispiel der Anlage *Bribin*, *Gunung Kidul*, Indonesien, verändert nach Nestmann et al. (2009)

Ausbaudurchfluss Q_A

Zur Beurteilung des Wasserdargebots sowie des Wasserkraftpotentials sind Kenntnisse über die Abflusscharakteristik von entscheidender Bedeutung. Hieraus lassen sich der Ausbaudurchfluss der Gesamtanlage sowie der zu erwartende Mindestabfluss ableiten. Auf Basis dieser Informationen können die Anzahl und Baugröße der Module gewählt werden.

So ermöglichen weitgehend konstante Bedingungen eine geringe Modulanzahl mit höherer spezifischer Leistung, bei starker Abflussfluktuation bzw. bei großer Differenz von Mindestabfluss und Ausbaudurchfluss ist tendenziell eine größere Modulanzahl sinnvoll, je nach Anwendungsfall mit gleicher oder unterschiedlicher Baugröße (siehe Kapitel 5.4).

Im Hinblick auf Karsthöhlenflüsse ist die Bewertung des Abflussdargebots aufgrund der komplexen Eigenschaften des Karstgesteins sowie aufgrund einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen wie z.B. der Niederschlagsvariabilität mit hohen Anforderungen verbunden (siehe Kapitel 2.3.3). Basierend auf den Untersuchungen der naturräumlichen Gegebenheiten in der Modellregion *Gunung Sewu* (siehe Kapitel 2.6.5) konnte für die Höhle *Bribin* ein Mindestabfluss auch während der jährlichen Trockenzeit von $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ angenommen werden.

Basierend auf der Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Daten wurde der Ausbaudurchfluss des Gesamtsystems auf ca. $1,95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ festgelegt (bezieht sich auf das Bemessungsstauziel von 15 m, siehe unten). Zur Gewährleistung des Betriebs auch im Fall einer erheblichen Unterschreitung des Ausbaudurchflusses wurde ein modulares Design mit fünf baugleichen, parallel installierten Fördereinheiten gewählt mit einem Schluckvermögen von jeweils ca. $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (ebenfalls bezogen auf eine Stauhöhe von 15 m, siehe Kapitel 4.1).

Fallhöhe H_f

Die Fallhöhe ist zusammen mit dem Ausbaudurchfluss und dem Wirkungsgrad der eingesetzten PAT(s) proportional zur generierbaren Leistung. Aufgrund der mechanischen Kopplung von PAT und Förderpumpe nimmt sie auch Einfluss auf die realisierbare Fördermenge. Zusätzlich reduziert sich die Förderhöhe der Pumpe(n), sofern diese vom gleichen Vordruckniveau wie die PAT(s) gespeist werden. Vor dem Hintergrund, dass Karst aufgrund einer Vielzahl von Klüften, welche durch Verwitterung des Kalksteins entstehen, durch eine hohe Permeabilität gekennzeichnet ist, musste die Eignung der Höhle *Bribin* zur dauerhaften natürlichen oder künstlichen Wasserhaltung aus geologischer und mineralogischer Sicht betrachtet werden. Drei wesentliche Charakteristika standen bei dieser Betrachtung im Vordergrund, welche sich maßgeblich auf Mutschler und Triantafyllidis (2009) sowie Neumann et al. (2009) bezieht.

Erstens weist der Höhlenabschnitt (beidseits begrenzt durch Siphons), welcher im Regelbetrieb vollständig eingestaut wird, keine Seitenhöhlen und somit keine Wasserverluste über derlei Verzweigungen auf. Zweitens kann das die Höhle *Bribin* umgebende Karstgestein als vergleichsweise kompakt mit geringem Anteil vernetzter Poren beschrieben werden, wodurch eine geringe Permeabilität des Gesteins resultiert. Die auftretenden Klüfte sind entweder durch Mergel verfüllt oder durch sekundäre Calcite „verheilt“. Die Untersuchungen, die zu diesem Schluss führten, konnten natürlich nur punktuell ausgeführt werden. Jedoch konnten die genannten Ergebnisse insbesondere für den sperrwerksnahen Bereich nachgewiesen werden, welcher im Betrieb durch den maximalen Druckgradienten belastet wird und somit am kritischsten für die dauerhafte Wasserhaltung ist. Drittens sind die Höhlenwände mit einer manganreichen Kruste überzogen (mit einer Dicke von wenigen Zentimetern bis hin zu mehreren Dezimetern), welche sich nur im Falle einer wiederholten vollständigen Füllung der Höhle über mehrere Jahrhunderte gebildet haben kann. Zudem konnte über Tracerstudien und nachgeschaltete Wasserbilanzierungen nachgewiesen werden, dass entlang der bekannten Gesamtlänge des Entwässerungssystems von ca. 17 km keine signifikanten Wasserverluste zu verzeichnen sind (Oberle und Nestmann, 2006). Den Untersuchungsergebnissen zufolge sollte der partielle Einstau des Karsthöhlenflusses im Regelbetrieb lediglich den über einen natürlichen Zugang erreichbaren und umfassend erforschten Teil der Höhle betreffen.

Diese Erkenntnisse führten zur Wahl eines geeigneten Standortes, welcher eine maximale Stau- bzw. Fallhöhe für den Regelbetrieb von 15 m ermöglicht. Dieser Wert wurde unter Berücksichtigung der bis zu diesem Zeitpunkt noch unbekanntes Kapazität des Karstgesteins bzgl. einer dauerhaften Wasserhaltung sowie der Lage der Seitenhöhle *Gua Ngreneng* festgelegt, welche durch das KIT in Kooperation mit indonesischen Partnern umfassend untersucht wurde. Letztere wird bei Überschreitung eines Staupiegels von 15 m aktiviert, wodurch im Regelbetrieb lediglich eine vernachlässigbare Wasserverlustmenge toleriert werden muss. Im Falle hoher Abflussmengen erfolgt eine zusätzliche Entlastung über diese Verzweigung, wodurch die Einhaltung des zulässigen Betriebsbereichs begünstigt wird. (Oberle und Nestmann, 2006)

Wirkungsgrad η_{PA}

Der Wirkungsgrad η_{PA} eines Fördermoduls setzt sich aus den Einzelwirkungsgraden der eingesetzten PAT (Maß für die Energie, die an einem bestimmten Standort durch regenerative Wasserkraft generiert werden kann) sowie der direkt gekoppelten Hochdruckpumpe (legt fest wie effizient die zur Verfügung gestellte Energiemenge genutzt werden kann) zusammen. Ist der Einsatz eines Getriebes erforderlich, um die Nennbetriebsdrehzahlen beider Maschinen anzupassen (siehe Kapitel 5.4), so muss auch dessen Wirkungsgrad $\eta_{Komp.}$ in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden. In Abhängigkeit des Moduldesigns werden eine (ohne Getriebe) oder zwei Kupplungen (mit Getriebe) benötigt, um die Maschinen zu verbinden. Auch durch diese Komponente(n) entstehen Energieverluste, wenngleich diese i.d.R. sehr gering sind.

Im Falle der Anlage *Bribin* konnte durch eine zielgerichtete Auslegung des Fördersystems ein Modulwirkungsgrad von ca. 55 % erreicht werden. Eine ausführliche Darlegung des Designprozesses sowie der Effizienzanalyse folgt in Kapitel 4.

Förderhöhe H_P

Die Förderhöhe H_P ergibt sich durch den geodätischen Höhenunterschied zwischen den Wasserspiegellagen im Stauraum und im Hochbehälter. Hinzu kommen die strömungsbedingten Energieverluste innerhalb des gesamten Rohrleitungssystems, welche quadratisch mit der Förderrate (bzw. mit der Strömungsgeschwindigkeit) zusammenhängen.

Beim Beispiel der Anlage *Bribin* liegt die Förderhöhe bei 220 m, bezogen auf die Höhe der Antriebswellen der PAT sowie auf den Hochbehälter *Kaligoro*, von wo aus das Wasser weiterhin gravitär an die umliegenden Siedlungen verteilt wird (siehe Kapitel 4.1).

Fördermenge Q_P

Die wesentliche Kenngröße der hier beschriebenen PAT-basierten Wasserfördersysteme ist die realisierbare Förderrate Q_P , welche in Abhängigkeit der zuvor genannten Parameter steht. Diese ergibt sich im Wesentlichen durch die Wasserverfügbarkeit, den Nutzungsgrad der Anlage sowie durch die Effizienz der eingesetzten Maschinenteknik.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage *Bribin*

Seit mehr als 15 Jahren beschäftigt sich das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) intensiv mit der Entwicklung und Implementierung angepasster Technologien und Konzepte zur Verbesserung der Wasserversorgungssituation in Mangelgebieten. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf der Technologieentwicklung und exemplarischen -implementierung in Karstgebieten. Die Modellregionen für diese F&E-Aktivitäten des IWG liegen vornehmlich im Bereich Südostasiens, so auch im Falle des deutsch-indonesischen Verbundvorhabens „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in *Gunung Kidul, Java, Indonesien*“ (siehe Kapitel 2.6).

Wenngleich die Erforschung von Karstregionen durch Experten aus aller Welt umfassende allgemeine Kenntnisse erbracht hat, so führt die Komplexität des Karsts in Bezug auf ihre naturräumlichen Bedingungen doch zur Einzigartigkeit jeder einzelnen Region. Erfahrungen zeigen, dass großskalige und komplexe technische Lösungen (z.B. Staudämme) für den Einsatz in Karstregionen häufig nicht geeignet sind und eine teils irreversible Schädigung des lokalen Wasserhaushalts nach sich ziehen können (Milanovic, 2002). Vor diesem Hintergrund weisen kleinskalige und dezentrale Lösungen aufgrund der erhöhten Anpassungsfähigkeit bzgl. der lokalen naturräumlichen, sozio-ökonomischen und sozio-kulturellen Bedingungen ein deutlich höheres bzw. nachhaltigeres Anwendungspotential auf.

In diesem Zusammenhang wurde in den 1980er Jahren seitens des indonesischen *Ministry of Public Works* (PU) ein britisches Beratungsbüro mit der Erforschung der Wasserressourcen *Gunung Sewus* beauftragt. Gleichsam wurden auch geeignete Örtlichkeiten zur Nutzbarmachung der besagten Ressourcen analysiert (MacDonalds & Partners, 1984). In der Studie wurden die enormen unterirdischen Karstwasserressourcen der Region aufgezeigt, was im Rahmen eines UNESCO-Förderprogramms zur Errichtung einer Wehranlage und Pumpstation in der Höhle *Gua Bribin* (indonesisch: Höhle *Bribin*) führte (Dittmann et al., 2011). Weiterhin dienten die Ergebnisse dieser Studie Ende der 1990er Jahre Wissenschaftlern des KIT als Grundlage für die Entwicklung zwei sich ergänzender Förderkonzepte, welche die nachhaltige Erschließung der Karstwasserressourcen zum Ziel hatten.

Das erste Konzept beinhaltet die Schaffung eines unterirdischen Wasserspeichers durch die Errichtung eines Betonsperrwerks, welches den Höhlenquerschnitt vollständig verschließt und somit das kontinuierlich zufließende Wasser aufstaut. Somit wird Druckhöhe für die Wasserkraftnutzung erzeugt, wodurch eine Teilmenge des Abflusses zu einem höher gelegenen Reservoir an der Oberfläche gefördert werden kann. Die weitere Verteilung erfolgt vorwiegend durch den Einfluss der Erdanziehungskraft.

Durch umfassende Feldstudien des KIT fiel die Wahl zur weltweit erstmaligen Umsetzung (Bauphase 2004 bis 2008) dieses Förderkonzeptes auf die Höhle *Gua Bribin*. Durch die somit geschaffene Pilotanlage sollte die Versorgung von bis zu 75.000 Menschen auch während der mehrmonatigen Trockenperiode sichergestellt werden.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Eine detaillierte Beschreibung des gesamten Implementierungsprozesses findet sich im Abschlussbericht des BMBF-geförderten Vorgängerprojektes (Förderkennzeichen 02WT0424) sowie in verschiedenen Veröffentlichungen (Oberle und Nestmann, 2006; Nestmann et al., 2009; Oberle et al., 2009; Nestmann et al., 2012).

Aufgrund der Lage der gewählten Karsthöhle *Gua Bribin* (100 m unter der Erdoberfläche) ergaben sich enorme Herausforderungen sowohl hinsichtlich der Erkundung des Standortes, der Entwicklung und Konstruktion des gesamten Anlagensystems als auch während der anschließenden Implementierungsphase (Nestmann et al., 2009). In den nachfolgenden Kapiteln werden das Anlagenkonzept und die Eigenschaften der eingesetzten Maschinen und Komponenten eingehend erläutert. Anpassungsmaßnahmen, welche aufgrund der Erfahrungen aus dem Dauerbetrieb abgeleitet, geplant und umgesetzt werden konnten, werden in den anschließenden Kapiteln dargestellt.

Beim zweiten Förderkonzept wird das Sperrwerk durch eine Holzrohrleitung ersetzt. Die Implementierung dieses Konzeptes kann mit geringerem Aufwand verbunden sein und weist eine geringere Abhängigkeit von den lokalen geologischen Randbedingungen auf. Eine wesentliche Anforderung bei der Standortauswahl ist jedoch ein ausreichendes Gefälle, sodass die gewünschte Druckhöhe über eine vergleichsweise kurze Strecke erzielt (z.B. über einen Wasserfall) und die Länge der Holzrohrleitung in einem umsetzbaren Rahmen gehalten werden kann. (Oberle und Nestmann, 2006)

4.1 Das Wasserfördersystem der Anlage *Bribin*

Die kontinuierliche und ausreichende Energieversorgung stellt insbesondere in entlegenen und infrastrukturell schlecht erschlossenen Regionen eine enorme Herausforderung dar. Dies betrifft gleichermaßen private Haushalte, lokale (Klein-) Industrie als auch existenzsichernde Einrichtungen wie Wasserförderanlagen. Technische Systeme im Inselbetrieb, deren Versorgung über erneuerbare Energien gewährleistet werden kann, weisen durch ihren autarken Betrieb ein deutlich höheres Anwendungspotential auf als netzbetriebene oder treibstoffabhängige Einrichtungen. Demzufolge wurde die Anlage *Bribin* mit einem wasserkraftbetriebenen Fördersystem ausgestattet, welches ein künstlich geschaffenes Wasserkraftpotential erschließt. In diesem Zusammenhang wurden invers betriebene Kreiselpumpen statt konventionellen Turbinen eingesetzt, da sich diese Technologie durch ihre hohe Anpassungsfähigkeit und Robustheit, hohe Verfügbarkeit von Maschinen und Ersatzteilen, einen vergleichsweise kostengünstigen Betrieb (einschließlich Wartung) sowie durch hohe Wirkungsgrade im Nennbetriebspunkt auszeichnet. (Nestmann et al., 2009)

Der substantielle Nachteil der PAT-Technologie gegenüber konventionellen Turbinen in Form einer fehlenden Regelapparatur zur Justierung der Maschinen im Falle von Abflussveränderungen konnte durch den modularen bzw. parallelen Aufbau mehrerer Maschinen kompensiert werden. Diese können individuell an- und abgeschaltet werden (siehe Abbildung 4.1), um das System an die jeweiligen Abflussbedingungen anpassen zu können. Somit kann ein breites Abflussspektrum mit hohem Wirkungsgrad bewirtschaftet werden, da die einzelnen Maschinen zumeist im jeweiligen Nennpunkt betrieben werden. Vor dem Hintergrund einer hohen Abflussvarianz von Karstflüssen (siehe Kapitel 2.3.3) ist dieses Konzept in Bezug auf einen nachhaltigen und effizienten Betrieb der Wasserfördereinrichtung von großer Bedeutung.

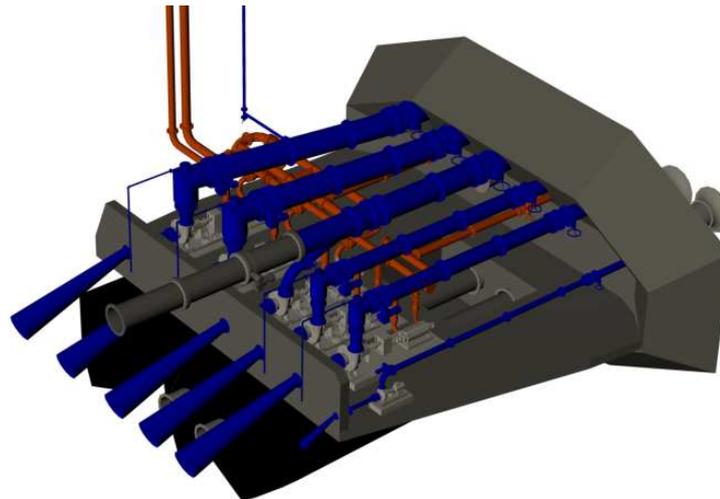


Abbildung 4.1: Modulares Design der Förderanlage *Bribin*, verändert nach Oberle et al. (2009)

Vor dem Hintergrund mangelhafter Datenbestände als Basis für den Entwicklungsprozess wurden PAT-Druckrohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern implementiert (siehe Abbildung 4.1), um eine nachträgliche Vergrößerung des Ausbaudurchflusses bei geringem technischem Aufwand zu ermöglichen (nachträgliches Umrüsten der ins Sperrwerk eingefassten Rohrschüsse ist somit nicht mehr erforderlich). Seitens des deutschen Industriepartners KSB AG, Frankenthal, wurden bereits verschiedene Maschinentypen mit unterschiedlichem Schluckvermögen analysiert, die im Falle eines Ausbaus zum Einsatz kommen können. Derlei Entscheidungen obliegen künftig der indonesischen Betreiberbehörde (siehe Kapitel 4.12). Als Bewertungsgrundlage können hierbei die Datenbestände dienen, welche während des Dauerbetriebes der Anlage gewonnen werden (siehe Kapitel 4.3.3).

Die Auswahl und Optimierung geeigneter Standardmaschinen wurde in enger Kooperation von KIT und der KSB AG durchgeführt. Auf der Basis vorausgegangener Optimierungsstudien (Singh, 2005) wurde für die Anlage *Bribin* ein PAT-Wirkungsgrad im Bestpunkt von 81 % erreicht (bei einem Schluckvermögen von ca. 375 l/s und einer Fall- bzw. Stauhöhe von 15 m). Eingesetzt werden einstufige, einflutige Spiralgehäusepumpen vom Typ ETANORM-R 300-340, deren Leistungsabgabe an der Welle im Arbeitsbereich bei ca. 46 kW liegt (Oberle et al., 2009). Dieser Maschinentyp eignet sich besonders für diesen Anwendungsfall, da sie sich durch hohe Zuverlässigkeit, Sicherheit und Robustheit auszeichnen. Dies zeigt sich daraus, dass bereits mehr als 1,5 Millionen Maschinen dieser Pumpenbaureihe weltweit im Einsatz sind. Darüber hinaus wird durch das modulare Baukastenprinzip sowohl die Neuanschaffung von Maschinen als auch die Ersatzteilbeschaffung deutlich vereinfacht. Aufgrund der Standardisierung sind die Maschinen einfach handhabbar bzw. können ohne großen Aufwand instandgehalten werden.

Tabelle 4.1: Spezifikation der in *Bribin* eingesetzten Modulkomponenten (Oberle et al., 2012)

Komponente	Hersteller	Modell	Teilwirkungsgrad
PAT	KSB AG	ETANORM-R 300-340	81 %
Stirnradgetriebe	Walther Flender GmbH	RXP1/808	92 %
Förderpumpe	KSB AG	Multitec D 65/9 6.1	74 %

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Als Förderpumpe werden neunstufige Gliederpumpen vom Typ Multitec D 65/9 6.1 verwendet, welche sich durch flexible Anpassung von Saug- und Druckstutzen sowie durch geringen Instandhaltungsaufwand auszeichnen. Um Baugröße und Stufenzahl der Hochdruckpumpe zu beschränken (siehe Kapitel 5.4) sowie zur Realisierung eines hohen Gesamtwirkungsgrades, wird die Drehzahl über ein Stirnradgetriebe mit einem Übersetzungsverhältnis von $i = 1,81$ ($n_T \approx 1.200 \text{ min}^{-1}$ auf $n_P \approx 2.200 \text{ min}^{-1}$) erhöht. Die Übersetzung ermöglicht den Betrieb beider Maschinen im jeweiligen Bestpunkt, wodurch die Getriebeverluste überkompensiert werden und ein Gesamtwirkungsgrad von 55 % erreicht wird. (Oberle et al., 2009)

Die mechanische Kopplung der Ein- und Ausgangswellen von PAT, Getriebe und Förderpumpe wurde über Wellenkupplungen vom Typ BIPEX BWN 127 und 182 des Herstellers A. Friedrich Flender AG, einer Tochtergesellschaft der Siemens AG, realisiert. Sie besteht unabhängig von der Baugröße aus zwei nockenbestückten Gussnabenteilen, die nach der Montage ineinandergreifen und somit das Drehmoment von Welle zu Welle übertragen. Die Drehelastizität der Kupplung wird über einen zwischen den Gussnocken sitzenden Polyurethan-Nockenring ermöglicht, der im Falle eines fertigungs-, montage- oder betriebsbedingten Wellenversatzes eine Deformation erfährt. Siemens AG (2008) zufolge führt diese Verformung zu einer Kompensation der durch den Wellenversatz resultierenden Rückstellkräfte in Form von Walkarbeit in den Elastomerpaketen, wodurch eine (unzulässig) hohe Lagerbelastung der verbundenen Maschinen vermieden werden kann. Die zulässigen Verformungen der in *Bribin* eingesetzten Kupplungen der BIPEX-Baureihe sind in Tabelle 4.2 angegeben. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass Wellenversätze radial, axial oder angular auftreten können, wobei die u.g. Werte nur bei eindimensionaler Verformung, nicht aber im Falle einer Superposition gelten (dies ist für die Ausführungen in Kapitel 4.10.2 bedeutsam).

Die BIPEX-Baureihe, die sich durch ihre Notlaufeigenschaft als durchschlagssichere Bauform auszeichnet, eignet sich insbesondere für Anwendungen mit gleichförmiger Drehmomentbelastung (Siemens, 2008). Im hier diskutierten Fall ist eine gleichförmige Last gegeben, da aufgrund des Retentionsvolumens sowie aufgrund des An- und Abfahrvorganges der Module über Absperrklappen mit elektrischen Stellantrieben oder manueller Betätigung keine plötzlichen Laständerungen zu erwarten sind. Auf Basis der gegebenen Betriebsbedingungen ergeben sich Kupplungswirkungsgrade von 99,2 % (zwischen PAT und Getriebe) bzw. 99,5 % (zwischen Getriebe und Förderpumpe).

Tabelle 4.2: Spezifikation der in *Bribin* eingesetzten Kupplungstypen (Siemens, 2008)

Lastfall		BIPEX BWN 127	BIPEX BWN 182
ΔK_a	Zulässiger axialer Versatz [mm]	0,50	0,50
ΔK_r	Zulässiger radialer Versatz [mm]	0,21	0,30
ΔK_w	Zulässiger Winkelversatz [grad]	0,10	0,10

Die einzelnen Komponenten der Fördermodule wurden auf dem Entwicklungsprüffeld der KSB AG sowohl einzeln als auch im späteren Komplettaufbau untersucht. Da das Laufrad einer Pumpe ursprünglich nicht für den Turbinenbetrieb konzipiert ist (siehe Kapitel 3.4), wurden durch mechanische Nacharbeit (Abrunden der Schaufelkanten, Glätten der strömungsführenden Oberflächen) die Laufräder und Gehäuse der PAT überarbeitet. (Oberle et al., 2009)

Im Rahmen dieser Tests wurde ermittelt, dass im zulässigen Fallhöhenbereich von 10 bis 16 m das Schluckvermögen einer PAT zwischen 305 und 390 l s⁻¹ liegt. Grundsätzlich erfordert der Anlagenbetrieb eine Mindestfallhöhe von ca. 10 m, sodass eine ausreichende Energiemenge für die Wasserförderung zum Hochbehälter zur Verfügung gestellt werden kann. Bei Unterschreitung dieses Grenzwerts kann die Förderhöhe zum Verteilspeicher (einschließlich der strömungsbedingten Energieverluste im Rohrsystem) nicht mehr überwunden werden, wodurch die mediengekühlten Hochdruckpumpen unzureichend gekühlt werden und Schaden nehmen können. Weiterhin führt die Korrelation der Betriebsdrehzahl der Module mit der Stauhöhe dazu, dass das Fördersystem bei einer Fallhöhe von 17 m abgeschaltet werden muss, um geschwindigkeitsinduzierte Schäden vermeiden zu können. In Bezug auf die im Regelbetrieb maximale zulässige Stauhöhe von 15 m kann ein einzelnes Modul eine Fördermenge von bis zu 13 l s⁻¹ zum Verteilerbauwerk leisten. Bei Vollaustattung der Anlage (alle 5 Module in Betrieb) können aufgrund der erhöhten Strömungsverluste bis zu 60 l s⁻¹ gefördert werden.



Abbildung 4.2: Das Fördersystem der Anlage *Bribin* nach der Implementierung der finalen Ausbaustufe²¹

Die Umsetzung der finalen Ausbaustufe war aufgrund der räumlichen Einschränkungen im Zugangsbereich zum Höhlensystem (über Lastenaufzug in 100 m tiefen vertikalen Schacht) sowie innerhalb der Höhle (auf der Maschinenplattform) selbst mit erheblichem technischem Aufwand verbunden (siehe Abbildung 4.2). In enger Kooperation mit indonesischen Fachunternehmen sowie mit dem lokalen Industrieservice der KSB AG konnte das Fördersystem unter kontinuierlicher Begleitung durch das KIT jedoch erfolgreich installiert werden. Hierzu mussten die auf einem Stahlgrundrahmen vormontierten Module demontiert werden, sodass die einzelnen Maschinen zur Anlagenplattform transportieren werden konnten. Nach der Installation war eine erneute Ausrichtung der Module erforderlich, um einen unzulässigen Verschleiß an Kupplungen und Lagern durch überhöhte betriebliche Belastung vermeiden zu können. Diese Maßnahme wurde umfassend durch lokale Servicetechniker der KSB AG unterstützt.

²¹ Abbildung von *Taupik Akbar*, freier Fotograf

Durch den Anlagenaufbau mit fünf parallel installierten Fördermodulen²² soll im Betrieb die Stauhöhe auf ein vorgegebenes Stauziel geregelt werden. Bis zum definierten Ausbaudurchfluss von 1,95 m³/s bei einer Stauhöhe von 15 m kann durch Zu- und Abschalten einzelner Module der Wasserspeicher bewirtschaftet werden. Grundsätzlich erfolgt das Zu- bzw. Abschalten der Fördermodule über Öffnen bzw. Schließen von Absperrklappen. (Oberle et al., 2009)

Im Falle einer Überschreitung des Ausbaudurchflusses der Anlage kann die kontinuierlich in den Stauraum zufließende Wassermenge nicht durch die fünf Fördermodule abgeführt werden. Somit ist eine zusätzliche Entlastung über ein Hochwasserentlastungssystem erforderlich, welches aus drei individuell regelbaren Rohrleitungen besteht (siehe Abbildung 4.1): Die beiden unter der Anlagenplattform gelegenen Grundablässe sind Bestandteil des ursprünglichen Anlagendesigns. Ein in eines der Module integrierter Bypass wurde nachträglich implementiert (siehe Kapitel 4.7).

4.2 Wechselwirkungen zwischen Anlage und Umwelt

Klimaschutz und effiziente Nutzung von Energie

Durch eine geeignete Konstruktion des WPS sollte die Nutzung erneuerbarer Energien und der weitgehende Verzicht auf Betriebsmittel wie Öle und Fette ermöglicht werden, sodass beim Anlagenbetrieb weder Schadstoffemissionen noch Abfallstoffe erzeugt werden und das Risiko einer Kontamination des Karstflusswassers bzw. des Aquifers ausgeschlossen werden kann. Die einzigen für den Anlagenbetrieb erforderlichen Betriebsmittel sind Getriebeöl sowie Schmierfett für die Wälzlager der Maschinensätze. Durch die Installation geeigneter Ablass- bzw. Einfüllvorrichtungen können ein unkontrollierter Öl- bzw. Fettaustritt konstruktiv ausgeschlossen und der hochvulnerable Karstaquifer somit vor Kontamination geschützt werden.

Die Wasserkraftnutzung ermöglicht den Verzicht auf für gewöhnlich in entlegenen Regionen eingesetzte Pumpsysteme mit Dieselgenerator- oder Netzstromantrieb. Somit werden nicht nur Rohstoffressourcen geschont sondern auch die finanziellen Ressourcen der Anlagenbetreiber. Weiterhin können die mit der konventionellen Energiebereitstellung verbundenen Emissionen eingespart werden. Das Ersetzen einer PAT durch einen Dieselgenerator (Annahme eines Wirkungsgrads von 33 %) würde zusammen mit den in *Bribin* eingesetzten Förderpumpen (Spitzenwirkungsgrad 74 %) zu einem Systemwirkungsgrad von 24 % und somit zu deutlichen Effizienzeinbußen führen. Unter diesen Voraussetzungen entspricht die bei Volllast durch eine PAT erzeugte Leistung von 46 kW einem stündlichen Verbrauch von ca. 15 Liter Dieselkraftstoff, dessen Verbrennung zu CO₂-Emissionen von 2,65 kg l⁻¹ führt. Rechnerisch belaufen sich die täglichen Einsparungen an CO₂-Emissions pro Modul auf bis zu 950 kg. (Dittmann et al., 2011)

Arbeitsschutz und Erdbebensicherheit

Durch ein *Monitoring*-System wird der Anlagenbetrieb kontinuierlich überwacht (siehe Kapitel 4.3.3). Im Störfall wird hierdurch ein Alarm (Sirene, Warnleuchten) ausgelöst, wodurch das Personal gewarnt wird und geeignete Maßnahmen zur Behebung der Situation einleiten kann. Das Sperrwerk ist erdbebensicher konzipiert, wobei selbst im Falle eines Versagens aufgrund der unterirdischen Lage keine Menschen gefährdet wären (Bohner et al., 2009).

²² Die Nummerierung der Module von 1 bis 5 erfolgt in Strömungsrichtung von links nach rechts, wobei die Module 1 und 2 sowie die Module 3 bis 5 jeweils eine gemeinsame Steigleitung speisen, die sich am Schachtkopf zu einer einzigen Förderleitung vereinen.

4.3 Die Regelung der Anlage *Bribin*

4.3.1 Das Regelungskonzept

Der Betrieb der Wasserförderanlage *Bribin* beruht auf der Stauzielregelung in einem vorgegebenen Bereich, was vornehmlich mithilfe des modularen Aufbaus der Anlage mit fünf parallel installierten Fördermodulen gewährleistet werden soll. D.h. durch An- bzw. Abfahren der Module kann auf einen Anstieg bzw. auf einen Abfall des Stauspiegels bei unterschiedlichen Zuflüssen in den Stauraum reagiert werden.

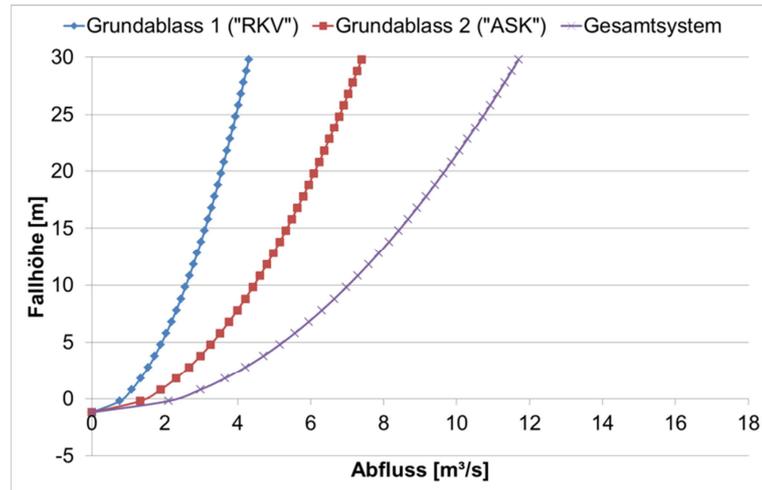


Abbildung 4.3: Durchflussleistung des Hochwasserentlastungssystems der Anlage *Bribin* vor der Erweiterung durch einen hydraulischen Bypass (siehe Kapitel 4.7), verändert nach Mastaller (2013)

Die Start- und Stoppvorgänge der Module erfolgen dabei über Öffnen und Schließen von Absperrklappen, welche sich in den PAT-Druckleitungen befinden (Typ AMRI ISORIA PN10, Hersteller KSB AG). Übersteigt der Stauraumzufluss das Schluckvermögen der gesamten Anlage (ca. $1,95 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), so erfolgt zunächst eine Entlastung über eine der beiden Grundablassleitungen, die mit einem Ringkolbenventil (RKV) DN600/700 PN10 der VAG GmbH, Mannheim, ausgestattet ist. Die in Abbildung 4.3 dargestellte progressive Durchflusskurve dieses Grundablasses wurde rechnerisch durch den Hersteller ermittelt und stellt bei Stauhöhen über 20 m die Durchflusswerte zunehmend überhöht dar. In Realität führt die Korrelation von Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsverlusten jedoch zu einer Begrenzung des Durchsatzes der Rohrleitung. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge kann für diesen Grundablass eine maximale Durchflussleistung von $3,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bei einer Stauhöhe von 20 m angenommen werden, die zusätzlich zum Schluckvermögen der Anlage abgeführt werden kann. Grundsätzlich ermöglicht das RKV als justierbare Armatur auch geringere Öffnungsgrade und kann demnach dem Abfluss entsprechend eingestellt werden.

Wird auch die Summe der Durchflusskapazitäten der Förderanlage und des Grundablasses mit Ringkolbenventil überschritten, so kommt die zweite, mit einer Absperrklappe (ASK) EKN188 DN800 PN10 der VAG GmbH ausgestattete Grundablassleitung zum Einsatz. Diese Armatur lässt im Betrieb jedoch keine Halbstellungen zu, weshalb sie lediglich bei extremen Abflussereignissen eingesetzt wird. Der realisierbare Durchsatz dieser Rohrleitung ist ebenfalls aufgrund der o.g. Zusammenhänge limitiert; in diesem Fall liegt der maximale Durchflusswert bei ca. $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bezogen auf eine Stauhöhe von 20 m (siehe Abbildung 4.3).

Bei Abflüssen, welche selbst bei Aktivierung aller Durchlässe (fünf Module und beide Grundablässe) durch das Sperrwerk zu einer weiteren Erhöhung des Pegels im Stauraum führen, können zunächst keine weiteren Maßnahmen zur Abführung der Wassermengen getroffen werden (eine etwaige Entlastung durch oberstrom gelegene Seitenhöhlen wird hierbei nicht berücksichtigt, da bei den Ausführungen in diesem Kapitel lediglich die an der Anlage ankommende Abflussmenge von Belang ist). Hohe Abflussmengen führen aufgrund der Abflussbegrenzung durch den unterstrom zur Anlage gelegenen Siphon gleichsam zu einem Anstieg des Unterwasserspiegels. Um eine Überstauung der Anlagenplattform über die unterwasserseitige Schutzmauer zu vermeiden, müssen einzelne Durchlässe geschlossen werden, gleichwohl dies zu einem verstärkten Anstieg des Staupegels führt. Bis zur Bemessungsgrenze des Sperrwerks bei einer Stauhöhe von 30 m ist eine Erhöhung des Stauspiegels zulässig, darüber hinaus müssen Ausgleichsmaßnahmen zur Stabilisierung des Bauwerks getroffen werden. In diesem Fall müssen weitere Durchlässe geöffnet und eine Überflutung der Plattform in Kauf genommen werden, da hierdurch die statische Last auf das Betonbauwerk reduziert werden kann.

4.3.2 Das Regelungssystem

Walcher et al. (2009) zufolge entwickelte der Industriepartner Walcher GmbH & Co. KG, Eichenzell, im Rahmen der ersten Projektphase ein SPS-gestützte Steuerungssystem (speicherprogrammierbare Steuerung) für den vollautomatischen modularen Anlagenbetrieb. Über die SPS-Einheit sollte das Zu- bzw. Abschalten einzelner Fördermodule sowie die Einstellung der Grundablassarmaturen mittels elektrischer Stellantriebe realisiert werden. Die Eigenstromversorgung dieses Steuerungssystems wird dabei durch einen selbstregelnden 10-kVA-Synchrongenerator übernommen, welcher mit einer rückwärts laufenden einstufigen KSB-Spiralgehäusepumpe des Typs ETA M 80-160 zur Energieversorgung verbunden ist. Mithilfe dieses Generators wurde zusätzlich die 24-V-Gleichspannungsversorgung einer Batterieanlage gewährleistet, durch die im Falle eines Funktionsausfalls des Generators die Betätigung der Verschlussorgane in den PAT-Druckleitungen sowie in den beiden Grundablässen ermöglicht werden sollte.

Die 24-V-DC-Versorgung erforderte aufgrund der hohen Stromaufnahme der Stellantriebe kurze Kabelstrecken zwischen den einzelnen Komponenten, weshalb der zugehörige Steuerschrank innerhalb der Höhle (im Zugangsschacht, ca. 8 m oberhalb der Schachtsohle) positioniert werden musste. Aufgrund des korrosiven Milieus sowie der ganzjährig hohen Luftfeuchte und Temperatur ergaben sich hieraus enorme Anforderungen an die elektrotechnische Ausstattung. Zusammengefasst lauteten die Anforderungen an das Regelungssystem wie folgt: (1) Regelung des Oberwasserpegels auf das vorgegebene Stauziel sowie Gewährleistung der optimalen Betriebseinstellung der Fördermodule und Grundablässe. (2) Überprüfung des Pegelstandes im oberirdischen Verteilspeicher und ggf. Abschaltung der Anlage bei vollständiger Füllung des Speichers. (3) Vermeiden einer Überflutung der Anlage aufgrund von Rückstauwirkungen sowie einer Schädigung des Betonsperrwerks durch unzulässig hohe statische Last.

Die Implementierung der SPS-gestützten Anlagensteuerung erfolgte bis zur offiziellen Übergabe der Anlage an die indonesische Betreiberbehörde im März 2010. Zuvor kam es im Februar 2010 im Rahmen von Funktionstests aufgrund einer unsachgemäß installierten PAT-Druckrohrleitung durch den lokalen KSB-Service zu einer Überflutung der Anlage. Hierbei wurde die Anlagenplattform vollständig unter Wasser gesetzt, wodurch es nicht zuletzt auch zu

Beeinträchtigungen von Komponenten des SPS-Steuerungssystems kam. Dies verdeutlicht das Risiko bzw. die Anforderungen bei der Implementierung eines komplexen Regelungssystems unter anspruchsvollen naturräumlichen Rahmenbedingungen.

Der hohe Automatisierungsgrad sowie die Redundanz einzelner Subsysteme und der Energieversorgung zur Sicherung der Funktionalität des Gesamtsystems führten zu einer komplexen elektrotechnischen Schaltung, deren Wartung bzw. Instandhaltung hohe Anforderungen an die elektrotechnische Ausbildung des Service-Personals stellte. Wenngleich ein hoher Automatisierungsgrad den Einfluss menschlicher Fehlbedienung reduzieren (bzw. ausschließen) kann, so wird der Umgang des Personals mit dem System auf die Wartungszyklen und ggf. auf spontan auftretende Schadensfälle beschränkt – ein routinierter Umgang durch tägliche Kontrollgänge sowie durch manuelle Einstellungen findet nicht statt (Oberle et al., 2012). Aus diesem Grund zeigte sich unmittelbar nach der erfolgreichen Erstinbetriebnahme der Anlage, dass aufgrund des *Black-Box*-Charakters des Regelungssystems bereits geringe Abweichungen vom Regelbetrieb und einfachste Betriebsstörungen (trotz umfassender Schulungen, siehe Kapitel 4.4.1) erhebliche Unsicherheiten innerhalb der Betriebsmannschaft entstanden, wodurch z.T. wochenlange Standzeiten der Anlage resultierten (Oberle et al., 2012).

4.3.3 Anpassung und Erweiterung von Konzept und System (M1 bis M3)

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde in Abstimmung mit den indonesischen Partnern eine Reduzierung des Automatisierungsgrades umgesetzt. Diese Maßnahme (**M1**) stellt die erste von sieben zentralen Anpassungen des ursprünglichen Anlagenkonzeptes dar, welche die Grundlage für die in Kapitel 1 vorgestellte Methodik zur Implementierung von WPS darstellen. Hierzu wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation maßgeblich an der Entwicklung des Systemkonzepts mitgewirkt sowie die anschließende Umsetzung verantwortlich vor Ort begleitet (März bis April 2011). Im Zuge der Entwicklung des Regelungssystems mussten vier zentrale Aspekte berücksichtigt werden, welche die Festlegung des Systemdesigns deutlich dominierten.

- Der erste Aspekt bezog sich auf die Systemanpassung an die Bildungshintergründe und Fähigkeiten des Betriebspersonals. Im Rahmen einer Befragung konnte ermittelt werden, dass alle Mitarbeiter den Abschluss einer technischen Schule vorweisen konnten, wobei sich die Fähigkeiten fast ausschließlich auf mechanische Systeme beschränkten, Kenntnisse über elektrische Systeme jedoch nicht gegeben waren.

Als zielführend wurde daher die Schaffung eines in Bezug auf den Funktionsumfang möglichst reduzierten Systems erachtet, das sich durch einfaches *Handling*, sprich geringen Bedien- und Wartungsaufwand auszeichnet. Bei gleichzeitiger Reduzierung des Funktionsumfangs wurde jedoch zur Gewährleistung eines sicheren Anlagenbetriebs eine redundante Erfassung von Betriebsparametern als unumgänglich erachtet.

- Der zweite Aspekt war die Berücksichtigung des geplanten kontinuierlichen Anlagenbetriebs, der mittels Inselbetrieb mit autarker Energieversorgung ganzjährig und rund um die Uhr unter Beaufsichtigung des Betriebspersonals erfolgen soll. Um insbesondere in der initialen Betriebsphase eine Überforderung des Personals durch unverhältnismäßig hohen Arbeits-/Regelungsaufwand und/oder durch die Übertragung hoher Verantwortung vermeiden zu können, musste ein geeigneter Betriebsbereich gewählt werden mit dem Ziel einer Beschränkung der Regelhäufigkeit in Form von manuellen Einstellungen am Förder- und Hochwasserentlastungssystem.

Der Oberwasserstand war als maßgeblicher Betriebsparameter bereits vorgegeben, da dieser Wert für die Antriebs- bzw. Förderleistung des Systems steht und in direkten Bezug zur Standsicherheit der Anlage bzw. des Sperrwerks gesetzt werden kann. Da das Stauvolumen von mehreren hunderttausend Kubikmetern im Falle extremer Abflussgradienten als Retentionsvolumen dient, wurde ein Toleranzbereich von $\pm 0,5$ m um das jeweilige Stauziel (siehe Kapitel 4.4.2) als ausreichend erachtet.

- Der dritte Aspekt war die Berücksichtigung der ganzjährig hohen Temperatur und Luftfeuchte sowie die hochkorrosive Umgebung in der Karsthöhle. Im Rahmen der Konzeptfindungsphase flossen dabei die Erfahrungen von der Implementierung des vollautomatischen Systems ein. Je nach Verwendungsort wurden unterschiedliche Feuchteschutzklassen der Komponenten des Kontrollsystems definiert – innerhalb der Höhle wurde dabei die Mindestanforderung auf IP67 (staubdicht, geschützt gegen zeitweiliges Untertauchen), an der Oberfläche auf IP66 (staubdicht, geschützt gegen starkes Strahlwasser) festgelegt.

Neben der technischen Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse musste bei der Komponentenauswahl auch die Beschaffungssituation in Indonesien sowie die Finanzierbarkeit von Ersatzteilen durch den Betreiber berücksichtigt werden. Hierbei wurde die Wahl von Standardkomponenten namhafter Hersteller (z.B. Siemens) als zielführend erachtet, da hierdurch die Kosten möglichst gering gehalten werden konnten. Durch die Verwendung standardisierter Bauteile wurde weiterhin auch der Einsatz von lokalen bzw. regionalen Produkten ermöglicht, welche auf Basis des gleichen internationalen Standards produziert wurden.

- Der vierte Aspekt bezog sich auf die Energieversorgung des Kontrollsystems, die im Hinblick auf einen sicheren Anlagenbetrieb ganzjährig zu jeder Tages- und Nachtzeit gewährleistet werden muss.

Da der Anlagenstandort über keinen Anschluss an das elektrische Stromnetz verfügt, wurde eine Inselösung mittels Photovoltaikanlage konzipiert, welche aus zwei Solarpanelen sowie einem Batteriespeicher für den Nachtbetrieb bzw. für Perioden mit unzureichender Sonneneinstrahlung besteht. Als Energiepuffer wurden herkömmliche 12-Volt-Autobatterien verwendet, die zur Bereitstellung der erforderlichen 24-Volt-Systemspannung in Reihe geschaltet wurden.

Monitoring und Aufzeichnung der maßgeblichen Betriebsparameter

Zur kontinuierlich Betriebsüberwachung sowie zur nachgeschalteten Betriebsanalyse wurde das Kontrollsystem mit zwei Datenloggern zur Aufzeichnung folgender Parameter ausgestattet.

- **Oberwasser:** Aufgrund der Festlegung des Oberwasserpegels als Regelgröße für den Anlagenbetrieb kommt diesem Parameter die größte Bedeutung im Hinblick auf die Standsicherheit des Betonsperrwerks sowie hinsichtlich der Funktionsfähigkeit des Fördersystems zu. Die Erfassung des Oberwasserpegels wird daher durch den Einsatz zweier redundanter Drucksensoren des Typs ATM.ECO/N 35 mWS (Messbereich 0...35 m Wassersäule, Genauigkeit bei Nenndruck < 2 bar bei $\leq \pm 0,7$ % *full scale*, hier $\leq \pm 0,245$ m) des Herstellers STS Sensoren Transmitter Systeme GmbH, Sindelfingen, gewährleistet. Beide Sensoren wurden an der Druckleitung des geplanten Generatormoduls installiert, da dessen weitere Verwendung nicht vorgesehen ist.

- **Unterwasser:** Das *Monitoring* des Unterwasserpegels ist bedeutsam, um im Falle extremer Abflussmengen oder eines Rückstaus durch eine Reduzierung der Abflussleistung des Unterstrom gelegenen Siphons eine Überflutung der Anlagenplattform von der Unterwasserseite verhindern zu können.

Im Hinblick auf die Reduzierung des Funktionsumfangs des Gesamtsystems erfolgt die Erfassung dieses Parameter durch den Einsatz einer einzelnen, an der unterwasserseitigen Schutzmauer installierten Tauchsonde des Typs LMP307 2,5 mWS (Messbereich 0...2,5 m Wassersäule, Genauigkeit bei Nenndruck < 0,4 bar bei $\leq \pm 0,5$ % *full scale*, hier $\leq \pm 0,0125$ m) des Herstellers DRUCK & TEMPERATUR Leitenberger GmbH, Kirchtellinsfurt.

- **Sickerwasser:** Trotz der in Kapitel 2.6.5.3 beschriebenen Eignung der Höhle *Bribin* für den Einstau des gleichnamigen Flusses wird das umgebende Gestein von einer (geringen) Teilwassermenge infiltriert, welches auf der Luftseite des Sperrwerks, vornehmlich oberhalb der Anlagenplattform als Tropf- bzw. Sickerwasser zu Tage tritt (Mutschler und Triantafyllidis, 2009). Eine kontinuierliche Abführung und Überwachung der auftretenden Mengen ist unabdingbar, um eine Überflutung der Plattform vermeiden sowie hydraulische Durchbrüche im Gestein frühzeitig erkennen und entsprechende Maßnahmen einleiten zu können.

Aus diesem Grund wurde ein Auffangsystem konzipiert, welches die wesentlichen Tropfstellen erfasst und die auftretenden Wassermengen in einen zentralen Messcontainer an der unterwasserseitigen Schutzmauer leitet. Durch die Messung des Pegels innerhalb dieses Containers sowie durch die Ausstattung des Behältnisses mit drei übereinandergelegenen Auslässen, deren Durchflusskapazität in Abhängigkeit von der Druckhöhe im Theodor-Rehbock-Laboratorium des IWG kalibriert wurde, kann die Sickerwassermenge bestimmt werden. Die Messung des Pegels erfolgt über eine Drucksonde des Typs ATM.ECO/N 1 mWS (Messbereich 0...1 m Wassersäule, Genauigkeit bei Nenndruck 0,1...0,5 bar bei $\leq \pm 1$ % *full scale*, hier $\leq \pm 0,01$ m) des Herstellers STS Sensoren Transmitter Systeme GmbH, Sindelfingen.

Die Abführung der nicht über das Rinnensystem erfassten Tropfmengen, welche sich in der zentral in der Maschinenplattform gelegenen Schieberkammer sammelt, erfolgt über eine 24-V-Tauchpumpe, deren Energieversorgung über die PV-Anlage des Kontrollsystem erfolgt.

Umfassende Untersuchungen mehrerer Teilprojekte des IWRM-Verbundes zeigen, dass die Sickerwasserströme im stationären Betrieb einen nahezu konstanten Wert annehmen. Eine Erhöhung der Mengen tritt bei zwei Szenarien auf: (1) Bei Überschreitung der maximal zulässigen Stauhöhe von 15 m, gleichbedeutend mit der Obergrenze des implementierten Injektionsschirms (zur Reduzierung der Sickerwassermengen im Regelbetrieb, siehe Kapitel 4.8), ist ein deutlicher Anstieg der Sickerwassermengen zu verzeichnen. (2) Kommt es zu einem hydraulischen Durchbruch im Umfeld der Anlage, ist eine sprunghafte Erhöhung der Tropfmengen zu erwarten.

In beiden Fällen ist die umgehende Kenntnisnahme durch das Betriebspersonal erforderlich, um geeignete Maßnahmen (Messung und Abführung der Mengen ins Unterwasser, ggf. Abstau im Falle einer starken Erhöhung der Mengen) zur Sicherung der Maschinenplattform ergreifen zu können. Entsprechende Handlungsanweisungen sind im eigens hierfür erstellten Betriebs- und Wartungshandbuch aufgeführt (siehe Kapitel 4.4.1).

- Fördermenge:** Zur Validierung der Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage sowie zur Analyse etwaiger Einflussgrößen auf die Leistung des Fördersystems im Dauerbetrieb ist die Erfassung der Förderrate essentiell. Mithilfe eines am Schachtkopf befindlichen magnetisch induktiven Durchflussmessers (IDM) des Typs FXE4000 COPA-XE (eingestellter Messbereich $0 \dots 250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, Genauigkeit bei $Q < 0,07 \cdot Q_{\max DN} \pm 0,00035 Q_{\max DN}$, hier $\leq \pm 0,0001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) des Herstellers ABB Automation Products GmbH, Göttingen, erfolgt die kontinuierliche Erfassung dieses Parameters. Hierdurch wird die Ausgangsfördermenge der Anlage *Bribin* ermittelt, nicht aber etwaige Wasserverluste auf der Rohrleitungsstrecke zum dreieinhalb Kilometer entfernten Verteilspeicher.
- Die Zusammenführung sämtlicher Messsignale (siehe Abbildung 4.4) erfolgt in einem zentralen, unmittelbar neben dem Schachtkopf gelegenen Schaltschrank (siehe Abbildung 4.5), auf dessen Front die erfassten Messwerte für das Betriebspersonal auf digitalen Anzeigen ausgegeben werden.

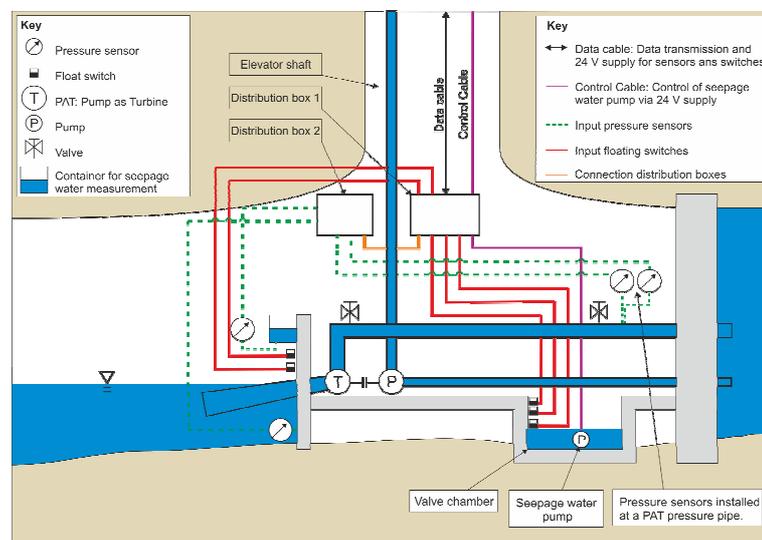


Abbildung 4.4: Funktionsschema des im Rahmen der Dissertation entwickelten Kontrollsystems für die Anlage *Bribin*

Alarmpfunktion bei Überschreitung hinterlegter Grenzwerte

Neben der Ausgabe der aktuellen Betriebsparameter ist die zweite Hauptfunktion des Schaltschranks die Anzeige etwaiger Alarmzustände, welche bei Überschreitung von im System hinterlegten Grenzwerten für die überwachten Parameter erreicht werden. Die Anzeige der Alarmzustände erfolgt über Kontrollleuchten mit unterschiedlicher Farbgebung (um Prioritäten festlegen zu können) sowie mittels einer am Schachtkopf befindlichen Sirene.

Das Personal wird somit im Falle eines unzulässigen Betriebszustandes alarmiert und erhält an zentraler Stelle alle nötigen Informationen, die zur Behebung des Alarmzustands erforderlich sind. Zusätzlich wurde das Kontrollsystem mit einer Testfunktion zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit sowie zur Neueinstellung der hinterlegten Grenzwerte ausgestattet. Diese Testfunktion ermöglicht die Simulation sämtlicher Alarmzustände ohne, dass tatsächlich ein Alarm ausgelöst wird. Eine Überprüfung des gesamten Systems kann somit innerhalb weniger Minuten im Rahmen von regelmäßigen Wartungsintervallen sowie bei Störungsfällen erfolgen. Die Nutzung der Testfunktion soll jedoch nicht durch das Betriebspersonal, sondern durch Wartungstechniker erfolgen, da die Funktion für den Arbeitsalltag nicht erforderlich ist und das Personal somit keine entsprechende Erfahrung sammeln kann.

Autarke Energieversorgung mittels Photovoltaikanlagen

Um die kontinuierliche und langfristige Funktionsfähigkeit des Kontrollsystems gewährleisten zu können, wurde die 24-V-Nennspannungsversorgung des Kontrollsystems sowie der gesamten messtechnischen Ausstattung durch zwei Photovoltaikmodule des Herstellers P.T. Sundaya, Jakarta, in Kombination mit einem Batteriespeicher realisiert. Hierdurch kann auch in Perioden mit geringer Einstrahlung bzw. nachts eine ausreichende Energiemenge zur Verfügung gestellt werden. Auch die o.g. Sickerwasserpumpe wird durch das System mit Energie versorgt.

Generell bedingt der Einsatz des Kontrollsystems bei manueller Betriebsweise je nach Abflussvariabilität im Karsthöhlensystem zwischen ein bis zwei (Trockenzeit) bzw. vier bis sechs (Regenzeit) täglichen Kontrollgängen zur Maschinenplattform, um Fördermodule an- bzw. abzufahren und/oder Grundablassarmaturen zu öffnen bzw. zu schließen. Wenngleich dies einen höheren personellen Aufwand bedeutet, so hat der manuelle Betrieb den entscheidenden Vorteil, dass das Personal durch den täglichen Umgang mit dem Fördersystem die notwendige Routine erhält, um auch in Ausnahmesituationen (z.B. Störfälle) angemessen agieren zu können. Dank der geringen Personalkosten vor Ort führt dies zu einem vernachlässigbaren finanziellen Nachteil, wodurch die Anlage problemlos rund um die Uhr besetzt werden kann.

Die Gestaltung des Schaltschranks erfolgte zur Sicherung der Akzeptanz und des Verständnisses des Betriebspersonals in Abstimmung mit dem indonesischen Betreiber. Dennoch zeigte sich, dass das ursprünglich gewählte Design die hinterlegten Funktionen auf eine Weise vermittelte, welche nicht von allen Mitgliedern des Betriebsteams verstanden wurde. Demzufolge war eine Umgestaltung der Frontplatte des Schaltschranks erforderlich zur Gewährleistung einer besseren Verständlichkeit (**M2**). Bei der neuen Version wurde auf eine klarere Strukturierung geachtet (siehe Abbildung 4.5). Weiterhin wurde auf der Frontplatte ein Notizfeld für den zulässigen Betriebsbereich hinzugefügt, welches vom verantwortlichen *Manager* der Anlage (siehe Kapitel 4.12) ausgefüllt und unterzeichnet werden muss. Diese Maßnahme wurde zur Übergabe der betrieblichen Verantwortung an das indonesische Personal gewählt.



Abbildung 4.5: Schaltschrank des Kontrollsystems in *Bribin* vor der Umgestaltung (links), nach der Anpassung zusammen mit dem Notaussystem (rechts)

Aufgrund der tiefen Lage untertage ist der Zugang zur Anlage abhängig von der Funktionstüchtigkeit des Aufzugs im Zugangsschacht. Um im Falle einer Funktionsstörung des Aufzugs die Anlage in einen sicheren Betriebszustand bringen zu können – ohne das Risiko eingehen zu müssen, eine oder mehrere Personen durch den Schacht zur Plattform abseilen zu müssen – wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine Notausfunktion konzipiert (**M3**), deren Betätigung das Anhalten der Module sowie das Öffnen der Grundablässe bewirkt. Die Notausfunktion kann als Ergänzung des Kontrollsystems betrachtet werden, wenngleich sie technisch gesehen ein eigenständiges System darstellt. Die Energieversorgung wird durch einen Dieselgenerator gewährleistet, welcher im Regelbetrieb die Antriebsenergie des Aufzugs sowie für sämtliche elektrische Stellantriebe der Anlage zur Verfügung stellt. Eine Anbindung der Notausfunktion an das 24-V-Netz des Kontrollsystems war aus elektrotechnischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll, da der Leistungs- und Spannungsbedarf der Stellantriebe die Ausgangswerte der Photovoltaikanlage sowie des Batteriespeichers deutlich übersteigt. Auch bei der Entwicklung dieses Systems wurde eine Minimierung des Funktionsumfangs angestrebt, um die Störungsanfälligkeit zu reduzieren sowie eine möglichst hohe Verständlichkeit seitens des Betriebspersonals zu erreichen. Die Leuchten an der Front des Notaus-Schaltschranks (siehe Abbildung 4.5, rechts, LEDs von oben) signalisieren:

- (1) Die Einsatzbereitschaft des Systems (weißes LED leuchtet, sobald der Generator in Betrieb ist; LED erlischt, sobald Notausfunktion betätigt wurde)
- (2) Den aktiven Stellvorgang der Module und Grundablässe (weißes LED blinkt nach Betätigung des Notausschalters)
- (3) Den erfolgreichen Abschluss des Stellvorgangs (grünes LED leuchtet)
- (4) Den Abschluss des Stellvorgangs im Falle einer technischen Störung eines oder mehrerer Stellantriebe (rotes LED leuchtet)

Im letztgenannten Fall muss die am unteren Ende des Schaltschranks befindliche Klappe geöffnet werden, um weitere Informationen bzgl. der Störung zu erhalten. Hinter der Klappe befinden sich für jeden der Stellantriebe zwei Leuchtanzeigen, die je nach Situation den erfolgreichen Abschluss des Stellvorgangs (grünes LED) oder eine Funktionsstörung (rotes LED) anzeigen. Diese Anzeige ermöglicht eine erste Beurteilung des Störfalls und dient im Falle der Anforderung eines Elektrikers zur besseren Vorbereitung des Vor-Ort-Einsatzes. Auf eine weitere Unterscheidung potentieller Fehlerquellen mittels LED (z.B. Fehleinstellung von Weg- und Drehmomentbegrenzung) wurde bewusst verzichtet, da zur Behebung des Störfalls ohnehin Fachpersonal angefordert werden muss und ein größerer Funktionsumfang des Notaussystems eine Einschränkung der Übersichtlichkeit bzw. Verständlichkeit des Systems zur Folge hätte.

4.4 Initiierung des Dauerbetriebs

Die Wasserförderanlage *Bribin* wurde im März 2010 in einem offiziellen Akt an die indonesischen Partner in Person von *Sri Sultan Hamengkubuwono X.*, dem Regenten der Sonderprovinz *Yogyakarta* (DIY) und Schirmherren des IWRM-Vorhabens, übergeben. Im Anschluss an die Übergabe wurde das gesamte Anlagensystem in einer initialen Betriebsphase durch mehrere Teilprojekte des Verbundes analysiert, wodurch die zuvor genannten sieben technisch-betrieblichen Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden konnten.

Zu Beginn dieser initialen Betriebsphase stand die Personalauswahl im Vordergrund, welche durch das KIT mithilfe der Ausarbeitung eines geeigneten Verfahrens zur Identifikation eines qualifizierten und motivierten Betriebspersonals unterstützt wurde. Um eine hohe Identifikation mit der Anlage zu erreichen, lag der Schwerpunkt auf der Beschäftigung von Personal, welches neben einer technischen Ausbildung möglichst Berufserfahrung innerhalb der PU gesammelt haben sollte. Die gewählten Personen wurden in zwei Teams von je sechs Personen aufgeteilt, welche im Drei-Tage-Rhythmus den Betrieb der Anlage übernehmen und permanent vor Ort sind. Über 60 % des Personals besitzt einen Abschluss einer (technischen) Berufsschule bzw. Bachelortitel; einschlägige Berufserfahrung konnte jeder zweite vorweisen.

4.4.1 Personalschulung

Für den dauerhaften Betrieb war die Anfangsphase weiterhin durch Schulungsmaßnahmen zur Qualifizierung des Personals geprägt. Diese Schulungen wurden vornehmlich im Rahmen der vorliegenden Arbeit konzipiert und umgesetzt (siehe Abbildung 4.6). In diesem Zusammenhang musste zunächst ein Bewusstsein für die mit dem Betrieb der Anlage einhergehende technische, betriebliche und finanzielle Verantwortung geschaffen werden. Das anfängliche Fehlen dieses Bewusstseins zeigte sich bspw. im Falle eines Hochwasserereignisses im Januar 2011. Zu diesem Zeitpunkt, als das Kontrollsystem mit integrierter Sickerwasserabführung noch nicht installiert war, mussten die auftretenden Tropfwässer durch das Betriebspersonal manuell ins Unterwasser gefördert werden. Mangelnde Sorgfalt führte jedoch bei Hochwasserereignissen zur Überflutung der Maschinenplattform sowie zu Schäden am Fördersystem (siehe Abbildung 4.7).



Abbildung 4.6: Durchführung von praktischen und theoretischen Schulungen für *Bribins* Betriebspersonal²³



Abbildung 4.7: Überflutung der Anlage *Bribin* (Januar 2011) führte zu Verunreinigung der Maschinen

²³ Beide Abbildungen von *Taupik Akbar*, freier Fotograf

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Derlei Versäumnisse sowie mögliche technische und betriebliche Konsequenzen für den weiteren Anlagenbetrieb waren daher Gegenstand der wiederholt durchgeführten Schulungen für das Personal. Hierbei wurde das Betriebspersonal mit der Betriebsstrategie der Anlage vertraut gemacht, welche mittels An- und Abfahren einzelner Module bzw. durch gezieltes Entlasten über die Grundablässe einen effizienten und möglichst konstanten Anlagenbetrieb ermöglichen soll. Dies ist von großer Bedeutung, da beispielsweise (starke) Schwankungen des Wasserspiegels im Stauraum zu einer (Re-) Mobilisierung von Schlämmen und somit zum Transport von Feststoffen Richtung Sperrwerk führen kann (erhöhte Gefahr der Stauraumverlandung).

Auch ist ein kontinuierlicher Betrieb für die eingesetzten Maschinen (insbesondere der Lager) im Vergleich zu häufigen An- und Abfahrvorgängen weniger belastend. Hierbei hat der manuelle Betrieb (siehe Kapitel 4.3.3) den entscheidenden Vorteil, dass das Betriebspersonal durch den täglichen Umgang mit der Maschinenteknik die notwendige Routine erhält, um auch in Ausnahmesituationen (z.B. Hochwasser, Störfälle) angemessen agieren zu können (Oberle et al., 2012). Des Weiteren wurde das Personal aus technischer Sicht befähigt, den Zustand des Fördersystems einschätzen und kleinere Wartungsarbeiten (z.B. Ölwechsel an den Getrieben) selbstständig durchführen zu können. Durch eine kontinuierliche Berichterstattung des Personals an den *Field Manager* (der für die Anlage *Bribin* verantwortliche Ingenieur mit Sitz in *Yogyakarta*, siehe Kapitel 4.12) sollen über die Notwendigkeit externer Serviceeinsätze entschieden und entsprechende Maßnahmen koordiniert werden.

Im Hinblick auf einen umfassenden Wissenstransfer wurden eigens zweisprachige (Englisch und *Bahasa Indonesia*), auf die Bildungshintergründe angepasste Schulungsunterlagen entwickelt (siehe Abbildung 4.8). Das im Rahmen der vorliegenden Dissertation erstellte Betriebs- und Wartungshandbuch enthält umfassende Informationen (Hersteller, Typbezeichnung, technische und betriebliche Eigenschaften usw.) bzgl. der eingesetzten Maschinen und Komponenten sowie der erforderlichen Betriebsmittel. Des Weiteren sind zur Vereinfachung der Ersatzteilbeschaffung Angaben zu Verschleißteilen sowie zur erforderlichen Lagerhaltung von Ersatzteilen enthalten, um Standzeiten der Anlage sowie den Wartungs- und Instandsetzungsaufwand möglichst gering halten zu können. Diese Anleitungen wurden sowohl zentral in der Anlage hinterlegt, als *Handout* an das Personal übergeben als auch als Lehrmittel bei den Schulungsmaßnahmen verwendet.

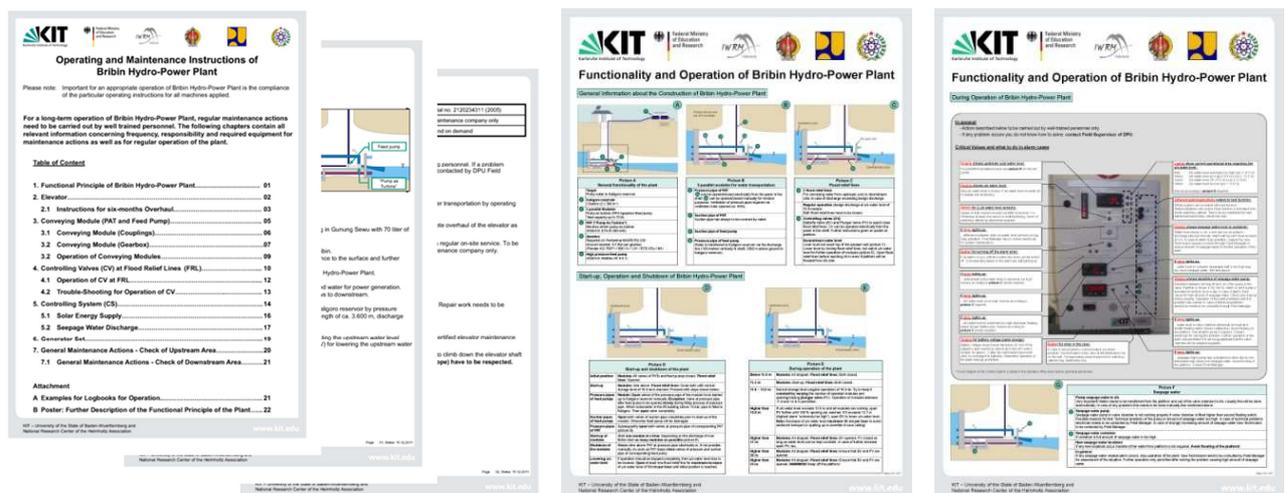


Abbildung 4.8: Im Rahmen der vorliegenden Dissertation entworfene Schulungs-, Betriebs- und Wartungsunterlagen für das Personal der Anlage *Bribin*

Zur Verdeutlichung der relevanten Betriebs- und Wartungsaspekte wurden einfache schematische Darstellungen sowie fotografische Abbildungen von der Anlage gewählt, um auch im Falle von Personaländerungen eine rasche und eigenständige Einarbeitung neuer Mitarbeiter ermöglichen zu können. Für die einzelnen Kapitel des Handbuchs wurde ein einheitliches Layout gewählt, sodass eine hohe Verständlichkeit sowie eine rasche Informationsbeschaffung gewährleistet werden kann. Diesbezüglich wurde auch eine möglichst einfache und knappe Ausdrucksweise mit klaren Anweisungen gewählt. Durch die kontinuierliche Aktualisierung und Erweiterung des Handbuchs wurde weiterhin eine Ergänzung von neuen technischen und betrieblichen Erkenntnissen im Hinblick auf einen nachhaltigen Anlagenbetrieb möglich.

Da das Handbuch insbesondere für Wartungsarbeiten von Bedeutung ist, wurden für den Alltag ergänzende, ebenfalls zweisprachige Beschilderungen zur Erläuterung des Anlagenbetriebs sowie einzelner Teilsysteme entworfen (siehe Abbildung 4.8). Hierdurch können sowohl das Betriebspersonal als auch Besuchergruppen umfassend über die technischen und betrieblichen Zusammenhänge informiert werden. Die teils fachkundigen Besuchergruppen sind insbesondere im Hinblick auf Vervielfältigungen des Anlagenkonzeptes *Bribin* als potentielle Multiplikatoren bedeutsam. So wurden Poster zur Erläuterung des Wasserförderkonzeptes der Anlage *Bribin* und zur Erklärung des Funktionsumfangs des Kontrollsystems entworfen.

Der Anspruch lag darin, den Zielgruppen einen Zugang zum Anlagenkonzept *Bribin* ohne Übermaß an technisch-betrieblichen Informationen zu ermöglichen. Im Sinne des partizipativen Ansatzes wurden daher sämtliche Schulungsunterlagen mit dem Betriebspersonal eingehend besprochen und im Falle von Verständnisproblemen entsprechend den Anmerkungen des Personals angepasst.

Ein weiterer Schwerpunkt des *Capacity Development* lag auf den Routinemessungen, welche im Dauerbetrieb zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Anlage erforderlich sind. Neben täglich durchzuführenden Temperatur- und Vibrationsmessungen an den Lagersitzen der Maschinen betraf dies auch manuelle Messungen zur räumlichen Differenzierung der auftretenden Sickerwassermengen (siehe Kapitel 4.8). Aufgrund des Pilotcharakters der Anlage waren die hierbei erzielten Ergebnisse sowohl für Anpassungen des Anlagenbetriebs als auch zur wissenschaftlichen Evaluierung des Gesamtsystems von großer Bedeutung.

4.4.2 Strategie zur Inbetriebnahme

Auf Basis der im Rahmen der Schulungsmaßnahmen vermittelten Kenntnisse konnte die Anlage im Juli 2011 gemeinsam mit der Betreiberbehörde PU (siehe Kapitel 4.12) in den Dauerbetrieb überführt werden. Aufgrund des Innovationscharakters der Anlage war insbesondere zu Beginn des Dauerbetriebs eine Begleitung vor Ort sowie eine kontinuierliche Wiederholung der Schulungsmaßnahmen erforderlich.

Mit zunehmender Betriebsdauer konnte die Unterstützung sukzessive reduziert und die technisch-betriebliche Verantwortung an die Betreiber übergeben werden. Weiterhin wurde aufgrund der zu Beginn fehlenden Betriebserfahrung mit den lokalen Betreibern eine schrittweise Anhebung des Stauziels vereinbart (siehe Abbildung 4.9). Hierdurch sollte dem Personal ausreichend Zeit gegeben werden, sich mit dem Anlagenbetrieb sowohl im Alltag (vornehmlich in der Trockenzeit) als auch bei Extremsituationen, bspw. aufgrund von Abflussschwankungen nach Starkniederschlagsereignissen (vornehmlich in der Regenzeit), vertraut zu machen. Das übergeordnete Ziel war eine schrittweise Annäherung an den in der Projektierungsphase festgelegten Nennbetriebspunkt des Fördersystems von 15 m.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

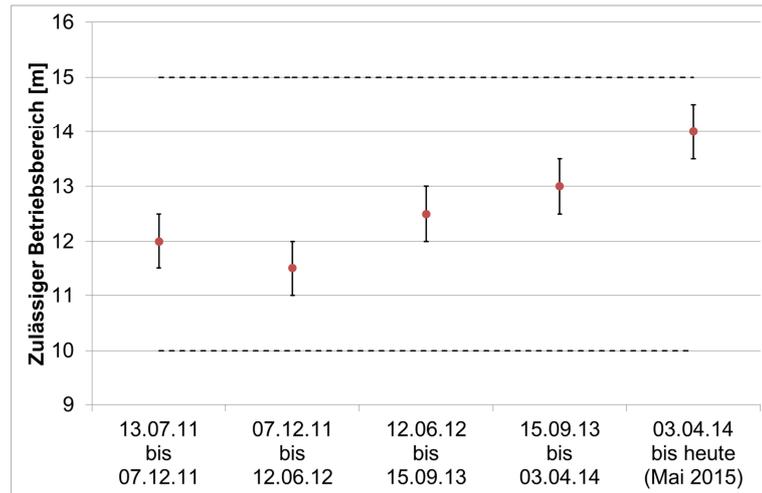


Abbildung 4.9: Anpassung des zulässigen Betriebsbereichs (Stauhöhe mit Toleranzbereich von $\pm 0,5$ m) in Abhängigkeit von der Erfahrung des Betriebspersonals, zulässiger Betriebsbereich durch gestrichelte Linien markiert

4.4.3 Evaluation der Arbeitsbedingungen

Durch die geleisteten *Capacity-Development*-Maßnahmen konnten die lokalen Betreiber umfassend auf den eigenständigen Betrieb der Anlage vorbereitet werden. In Verbindung mit einer noch unveränderten personellen Besetzung der Anlage (Stand August 2015) konnte somit eine hohe Identifikation des Personals mit der Anlage erzielt werden. Inzwischen werden alle erforderlichen betriebs- und wartungsbezogenen Aufgaben in voller Eigenverantwortung der indonesischen Betreiber durchgeführt (siehe Abbildung 4.10).



Abbildung 4.10: Wartungsarbeiten am Kontroll- (links) sowie am Fördersystem (rechts) in Bribin durch den lokalen Betreiber

Einer Befragung des Betriebspersonals zufolge, welche Teil der Vorarbeit zur vorliegenden Dissertation war, werden die Schulungs-, Betriebs- und Wartungsunterlagen als sinnvoll und hilfreich betrachtet (Zustimmung²⁴ lag bei 91 %). Der Sinn der einzelnen Tätigkeiten, welche mit dem Anlagenbetrieb verbunden sind, wurde durch das Personal erkannt (91 %), wenngleich die Hintergründe zum Zeitpunkt der Umfrage noch nicht ausreichend beschrieben worden waren

²⁴ Die Antworten waren in fünf Kategorien unterteilt (trifft völlig zu bis trifft überhaupt nicht zu) und wurden für die Auswertung in 20 %- Schritte umgerechnet. Die Befragung umfasste elf von zwölf Teammitgliedern, woraus letztlich die im Text angegebenen Prozentanteile ermittelt wurden.

(65 %). Dementsprechend wurden zusätzliche Schulungen angesetzt, um die Hintergründe der maßgeblichen Aufgaben weiter zu beleuchten. Beispiele hierfür sind die Einhaltung des vorgegebenen Betriebsbereichs, um eine hohe Effizienz des Fördersystems zu erreichen. Hingegen wurden die vermittelten Kenntnisse über den Grund für die manuellen Messungen (93 %) sowie in Bezug auf deren Durchführung (87 %) als ausreichend beschrieben.

Die Implementierung des Kontrollsystems wurde ebenfalls sehr positiv bewertet (93 %), da es nach Aussage des Personals eine erhebliche Erleichterung der täglichen Arbeit ermöglicht. Durch die bewusste Auseinandersetzung mit dem Kontrollsystem kann dessen Funktionsweise als nahezu vollständig bekannt bezeichnet werden (89 %). Auch wurde durch die Schulungen ein Bewusstsein geschaffen, um im Alarmfall umgehend zu reagieren (89 %). Einzige Einschränkung ist hier der bewusste Unterschied zwischen Regen- und Trockenzeit – so gab das Personal an, in der Regenzeit deutlich schneller zu reagieren (95 %), da hier tendenziell höhere Abflussgradienten auftreten. Die erforderlichen Schritte nach Auslösen eines Alarms wurden allgemein als bekannt angegeben (91 %), wobei nach Möglichkeit versucht wird, Neueinstellungen vor Erreichen eines Alarmzustands vorzunehmen (89 %).

Eine wichtige Zielgruppe für den Technologie- und Wissenstransfer, welcher mithilfe der Anlage *Bribin* geleistet werden soll, sind Besuchergruppen von nationalen und internationalen Behörden, Hochschulen, Unternehmen sowie private Interessensvertreter. Häufig werden im Rahmen der Besichtigungen Fragen in Bezug auf die Anlagenfunktion sowie auf die Arbeitsbedingungen an das Betriebspersonal gerichtet (91 %). Dabei sieht sich das Personal befähigt, die Funktion des Kontrollsystems sowie die wesentlichen Tätigkeiten sachgerecht zu erklären (84 %). Nicht zuletzt hierdurch können sowohl das Multiplikationspotential der eingesetzten Technologien ausgeschöpft als auch die Verbindung des Personals zur Anlage intensiviert werden.

Diese Verbindung ist in Bezug auf die Zusammenarbeit innerhalb sowie zwischen den beiden Teams vorteilhaft. Dem Personal zufolge ist die Arbeit mit den Teammitgliedern sehr positiv zu bewerten (95 %), auftretende Probleme werden teamintern (89 %) sowie mit der anderen Gruppe besprochen (75 %). Auch erfolgt der Schichtwechsel i.d.R. durch mindestens zwei Personen je Team (84 %), um neue Informationen und Erkenntnisse weitergeben und die Anlage im Notfall regeln zu können.

Auch die Empfehlungen des Personals, welche im Rahmen der Befragung ausgesprochen wurden, zeugen von einem umfassenden Verständnis über die Funktionsweise der Anlage sowie in Bezug auf die Instandhaltung der technischen Einrichtung. So wurde bspw. eine zeitnahe Behebung technischer Störungen (z.B. defekte Dichtungen an PAT oder Förderpumpe) angeregt, um die resultierenden Standzeiten möglichst gering halten zu können. Auch wurde erbeten, sämtliche Steuerelemente für die elektrischen Stellantriebe aus dem Zugangsschacht an die Oberfläche zu verlegen, um den Aufwand bei der Neueinstellung der Anlage zu reduzieren. Die Überwachung der Plattform könnte demzufolge mithilfe einer Kamera erfolgen. Wenngleich dieser Vorschlag durchaus berechtigt ist, so wurde auf die Verlegung der Steuerelemente aus didaktischen Gründen verzichtet, da andernfalls keine zwingenden Gründe für die Routinekontrollen der Maschinenplattform bestehen würden und die daraus resultierende Gefahr an zu spät erkannten Schäden und Problemen als zu hoch eingeschätzt wurde.

Da der Betrieb von Seiten des KIT über mehrere Regen- und Trockenzeiten kontinuierlich begleitet und umfassend analysiert wurde, sind aus heutiger Sicht (Stand August 2015) keine zusätzlichen wesentlichen Schulungsmaßnahmen zur Gewährleistung des nachhaltigen Anlagenbetriebs erforderlich.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Im Hinblick auf die technische und finanzielle Unterstützung von Seiten der indonesischen Verantwortlichen für den Dauerbetrieb der Anlage *Bribin* gibt es jedoch weiterhin erheblichen Verbesserungsbedarf. So bezeichnet mehr als die Hälfte des Personals die Reaktionsdauer der Vorgesetzten auf Meldungen von Mängeln als unzureichend, zwei Drittel sind mit der Dauer für die letztendliche Umsetzung von Abhilfemaßnahmen unzufrieden. Auch die Ausstattung der Anlage (Werkzeug, Treibstoffe für Notstromgenerator, Kletterequipment für die gesicherte Evakuierung der Anlagenplattform bei Ausfall des Aufzugs) wird als mangelhaft empfunden.

Weiterhin lag die Zustimmung bei der Frage, ob die Arbeitsbelastung während der Regenzeit als zu hoch angesehen wird, bei 84 %. Der Grund dafür ist, dass es in Perioden mit häufigen und starken Niederschlägen auch nachts zu einem plötzlichen Anstieg der Abflussmengen sowie des Staupegels kommen kann, wodurch eine umgehende Reaktion des Personals in Form einer Neueinstellung des Systems auf die aktuellen Bedingungen erforderlich ist. Insbesondere vor dem Hintergrund der nach Ansicht des Personals unangemessenen (800.000 indonesische Rupiah pro Kopf und Monat, entspricht ca. 54,61 €²⁵) und i.d.R. verspäteten Lohnzahlung ist die Einschätzung einer zu hohen Arbeitsbelastung mit deutlichen Risiken für die Anlage verbunden. Außerdem sehen sich fast 30 % des Personals durch die mangelhafte Bezahlung gezwungen zur Versorgung ihrer Familien einen Zweitberuf auszuüben.

Des Weiteren werden von Seiten des Betreibers keinerlei Versicherungsleistungen gewährt (weder Kranken- noch Unfallversicherung), wodurch das Personal versucht, (vermeintlich) gefährliche Tätigkeiten möglichst zu meiden. So lag die Zustimmung zur Frage, ob es Tätigkeiten gibt, die als gefährlich empfunden werden, bei 94 %. Ein Beispiel hierfür sind Kontrollgänge zur Anlagenplattform im Falle von Stauhöhen, welche zwar den zulässigen Betriebsbereich überschreiten, jedoch noch unterhalb der von Seiten des KIT angegebenen maximalen Höhe liegen, bei der Arbeiten auf den Anlagenplattform zulässig sind (25 m). Gerade im Falle von Hochwasserereignissen ist eine kontinuierliche Überwachung der Anlage von großer Bedeutung, um Schäden bspw. durch Überflutung durch erhöhte Sickerwassermengen oder Rückstaueffekte vom Unterstrom gelegenen Siphon abwenden zu können. Auch mögliche Ausfälle des Aufzugs im Zugangsschacht werden als besonders kritisch erachtet, sofern sich noch Personen auf der Anlagenplattform aufhalten, da Evakuierungen aufgrund der unzureichenden Einweisung und Ausrüstung mit erheblichen Risiken verbunden sind.

Von Seiten des KIT wurde auf diese Missstände wiederholt hingewiesen und die Unterstützung etwaiger Bergungsaktionen durch den ortsansässigen Speleologenclub ASC (*Acintyacunyata Speleological Club*), *Yogyakarta*, dringend empfohlen. Auch alle weiteren genannten Kritikpunkte wurden wiederholt mit den indonesischen Verantwortlichen besprochen und Möglichkeiten zur Verbesserung aufgezeigt.

Trotz allem ist das Engagement des Personals vorbildlich. Nahezu 100 % geben an gerne in *Bribin* zu arbeiten bzw. stolz darauf zu sein, in einem internationalen Projekt zur Unterstützung der lokalen Bevölkerung mitzuwirken. Auch ist von mehr als 80 % des Personals die Bereitschaft gegeben gegen entsprechende Vergütung zusätzliche anspruchsvolle Aufgaben (bspw. bei Erweiterung des *Monitorings*) zu übernehmen und gegen angemessene Zuschläge an religiösen Feiertagen (z.B. *Idul Fitri*, *Idul Adha*) zu arbeiten (82 %). Dies ist bedeutsam im Hinblick auf den kontinuierlichen Anlagenbetrieb, da ohne dieses Entgegenkommen eine Unterbrechung der Wasserversorgung durch zeitweise Abschaltung unumgänglich ist, was insbesondere in der Trockenzeit erhebliche Probleme für die Bevölkerung nach sich ziehen würde.

²⁵ Wechselkurs 14.649 IDR EUR⁻¹ vom 06.05.2015, www.oanda.com

Gerade die Bewohner *Gunung Sewus*, welche an das Verteilnetz der Anlage *Bribin* angeschlossen sind, sind lt. Aussage des Betriebspersonals sehr stolz darauf, dass die Anlage in ihrer Region errichtet wurde. Auch sollen sich die Lebensbedingungen durch den einfacheren und kontinuierlichen Zugang zu Wasser (insbesondere in der Trockenzeit) verbessert haben (bspw. durch die Vereinfachung der Nutztierhaltung).

Mit der dauerhaften Versorgung hat sich jedoch auch die Erwartungshaltung verändert, wonach das Betriebspersonal im Falle einer zeitweisen Abschaltung der Förderanlage umgehend mit Fragen nach Grund und Dauer der Versorgungsunterbrechung konfrontiert wird, teils begleitet durch Unmutsbekundungen.

4.5 Validierung der Förderleistung

4.5.1 Vorgehen

Neben dem realen Nutzen, den die Förderanlage *Bribin* für die Menschen in der Region *Gunung Sewu* in Form einer Verbesserung der Wasserversorgung leisten kann, ist sie auch aus wissenschaftlicher Sicht aufgrund ihres technologischen Pilotcharakters sowie dem daraus resultierenden hohen Anwendungspotential für weitere Bedarfsregionen weltweit von großer Bedeutung. Um zunächst die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Technologien bewerten zu können, ist ein Abgleich mit den Testergebnissen erforderlich, welche auf dem Prüffeld des Herstellers KSB AG generiert wurden.

Zur Validierung wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine umfassende Messkampagne vor Ort durchgeführt (September bis November 2011), wobei die Förderleistung der Anlage in Abhängigkeit von der Modulanzahl und der Variation des Stauspiegels ermittelt wurde. Die Erfassung und Evaluierung der geförderten Wassermenge bei unterschiedlichen Anlageeinstellungen erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Betreiber PU sowie der KSB AG.

Gemessen wurde die Förderleistung mittels eines induktiven Durchflussmessgeräts (IDM), welches in der Nähe des Schachtkopfes installiert ist und als Teil des Kontrollsystems auch im Dauerbetrieb der Anlage *Bribin* zur kontinuierlichen Durchflussmessung eingesetzt wird.

Zur Überprüfung der Messwerte sowie zur Ermittlung von Wasserverlusten auf der Rohrleitungsstrecke von der Anlage zum 220 m höher gelegenen Verteilspeicher *Kaligoro* wurden weitere Messungen mit einem Ultraschall-Durchflussmesser (UDM) durchgeführt. Diese erfolgten unmittelbar vor dem Einlass des Verteilspeichers. Zusätzlich wurden die generierten Messwerte punktuell durch Pegelmessung im Verteilspeicher sowie eine nachgeschaltete Volumenbilanzierung überprüft. Angaben zu den bei der Messkampagne eingesetzten Messgeräten können Tabelle 4.3 entnommen werden.

Tabelle 4.3: Spezifikation der eingesetzten Durchflussmesser zur Validierung des Fördersystems der Anlage *Bribin*

Messstelle	Messgerät	Hersteller	Typ	Max. Messabweichung
Schachtkopf	IDM	ABB Automation Products GmbH	COPA-XE DE43F DN200	±0,5 % bis ±3 % vom Messwert in Abhängigkeit vom Durchfluss
Hochspeicher	UDM	Endress + Hauser Messtechnik GmbH + Co.KG	<i>Proline Prosonic</i> 93T Portable	±2 % vom Messwert

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Die Messergebnisse von IDM und UDM lagen im Mittel zwischen 3,2 % (1 Modul im Betrieb), 1,2 % (2 Module), 0,7 % (3 Module), 1,0 % (4 Module) und 1,6 % (5 Module) auseinander, was im Bereich der von Seiten des Herstellers angegebenen Standardabweichung liegt (siehe Tabelle 4.3). Demnach konnten die erzielten Ergebnisse durch unterschiedliche Messmethoden verifiziert und eine wasserverlustfreie Strecke zwischen Anlage und Verteilspeicher nachgewiesen werden. Im Weiteren werden die mithilfe des IDM ermittelten Ergebnisse verwendet, da dieses Gerät dauerhaft in *Bribin* Anwendung findet und sich daher besser für Kontrollmessungen eignet. Weiterhin erfolgte seit der Inbetriebnahme der Anlage im Juli 2011 eine kontinuierliche Aufzeichnung der Betriebsparameter mithilfe des in Kapitel 4.3.3 vorgestellten Kontrollsystems.



Abbildung 4.11: Durchflussmessungen mittels Ultraschallmessgerät in Zusammenarbeit mit dem Betreiber PU und der Universität *Gadjah Mada* (UGM), *Yogyakarta*, (links) in *Bribin* und am Verteilspeicher *Kaligoro*²⁶ (Mitte und rechts)

Um das Anlagenverhalten im Dauerbetrieb eingehend analysieren zu können, wurden daher die Datenaufzeichnungen bis einschließlich Juni 2014 (insgesamt drei Jahre) ausgewertet und mit den Ergebnissen der Prüffeldtests sowie der Messkampagne abgeglichen (siehe Kapitel 4.5.3).

4.5.2 *In-situ* Messkampagne

Zur Untersuchung des Regelbetriebsbereichs der Anlage wurde im Rahmen der Messkampagne eine Variation der Fallhöhe im Bereich von 10 bis 14 Metern in Ein-Meter-Schritten bei unterschiedlichen Modulkonfigurationen (siehe Tabelle 4.4) vorgenommen. Da zu diesem Zeitpunkt die Untersuchungen zum Verhalten der im Betrieb unvermeidlichen, mit dem Stauspiegel korrelierenden Sickerwassermengen noch nicht abgeschlossen waren, wurde eine weitere Erhöhung bis zum Bemessungsstauziel von 15 m als nicht sinnvoll erachtet (siehe Kapitel 4.8). Um während der Messkampagne weitgehend konstante Bedingungen für die Datenerhebung gewährleisten zu können, erfolgte die Regelung des Staupegels zusätzlich mithilfe der beiden Grundablässe.

Bei jeder Einstellung wurden sowohl durch das Kontrollsystem als auch mittels UDM punktuelle Messwerte in Zweiminutenintervallen über einen Zeitraum von 30 Minuten erfasst (d.h. 16 Messwerte je Einstellung ohne Mittelung über das Messintervall). Zur Bewertung des Leistungsvermögens der Module war aufgrund unterschiedlicher Durchmesser der PAT-Zuleitungen (Module 1 und 2: DN450; Module 3 bis 5: DN700) zunächst die Betrachtung der Nettofallhöhe auf Basis der ermittelten Werte erforderlich. Dies ist die Fallhöhe, welche sich aus der Differenz von Oberwasserpegel, Unterwasserpegel und hydraulischen Verlusten (Rohrreibungsverluste und lokale Verluste durch Einbauten wie Armaturen, Krümmer und Querschnittsänderungen) in der Zuleitung der PAT ergibt. Für die Module mit DN450-Druckleitung (DN700) lag die Nettofallhöhe durchschnittlich 3,3 % (0,5 %) unter dem Bruttowert.

²⁶ Abbildung von *Taupik Akbar*, freier Fotograf

Tabelle 4.4: Im Rahmen der Messkampagne analysierte Modulkombinationen

Einstellung	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4	Modul 5
I	•				
II		•			
III			•		
IV				•	
V					•
VI	•		•		
VII	•				•
VIII			•	•	
IX				•	•
X			•	•	•
XI	•		•	•	•
XII	•	•	•	•	•

Ursächlich für diesen Unterschied sind unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, da die PAT bei allen Modulen als durchflusslimitierende Komponente wirkt. Beim Nennbetriebspunkt (Fallhöhe von 15 m) ergeben sich Strömungsgeschwindigkeiten von $2,4 \text{ m s}^{-1}$ (DN450) bzw. 1 m s^{-1} (DN700) und somit unterschiedliche Rohrleitungsverluste.

Bei der Auswertung der Messkampagne sowie bei der anschließenden Evaluierung der im kontinuierlichen Anlagenbetrieb ermittelten Betriebsparameter (siehe Kapitel 4.5.3) wird die Nettofallhöhe berücksichtigt, da dieser Wert ein Maß für die verfügbare Energiemenge an der PAT darstellt. Die nachstehenden Darstellungen (Abbildung 4.12 bis Abbildung 4.16) beziehen sich daher auf diese Größe. Weiterhin zeigen sie den Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Fördermenge sowie Gesamtwirkungsgrad und Fördermenge, jeweils als Funktion der Anzahl betriebener Module.

Bei den Hochdruck-Förderpumpen wurden die Strömungsverluste in der Zu- bzw. Saugleitung vernachlässigt, da sie in Bezug auf die Förderhöhe zum Verteilspeicher *Kaligoro* vergleichsweise gering ausfallen. Die Verluste in der Förderleitung wurden bei der Berechnung des Gesamtwirkungsgrades hingegen berücksichtigt, da diese aufgrund der Leitungslänge von ca. 3,5 km nicht deutlich höher ausfallen.

Den Ergebnissen zufolge liegen die ermittelten Fördermengen im zulässigen Betriebsbereich (Fallhöhe 10 m bis 15 m) bei allen Messeinstellungen mehrheitlich über den auf dem Prüffeld generierten Werten. Insbesondere im Teillastbereich liegen die realen Werte teils um mehr als 10 % über den Prüffeldergebnissen. Mit zunehmender Fallhöhe nimmt diese Differenz ab, sodass bei der Bemessungsfallhöhe von 15 m eine Übereinstimmung von Prüffeld und realer Anlage gegeben ist.

Auch die dargestellten Wirkungsgradkennlinien als Funktion der Fördermenge liegen mehrheitlich über den auf dem Prüffeld ermittelten Kurven, wobei die Differenz auch hier mit zunehmender Fördermenge sinkt und die gemessenen Werte gegen die Designgröße des Gesamtwirkungsgrades (55 %) konvergieren.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

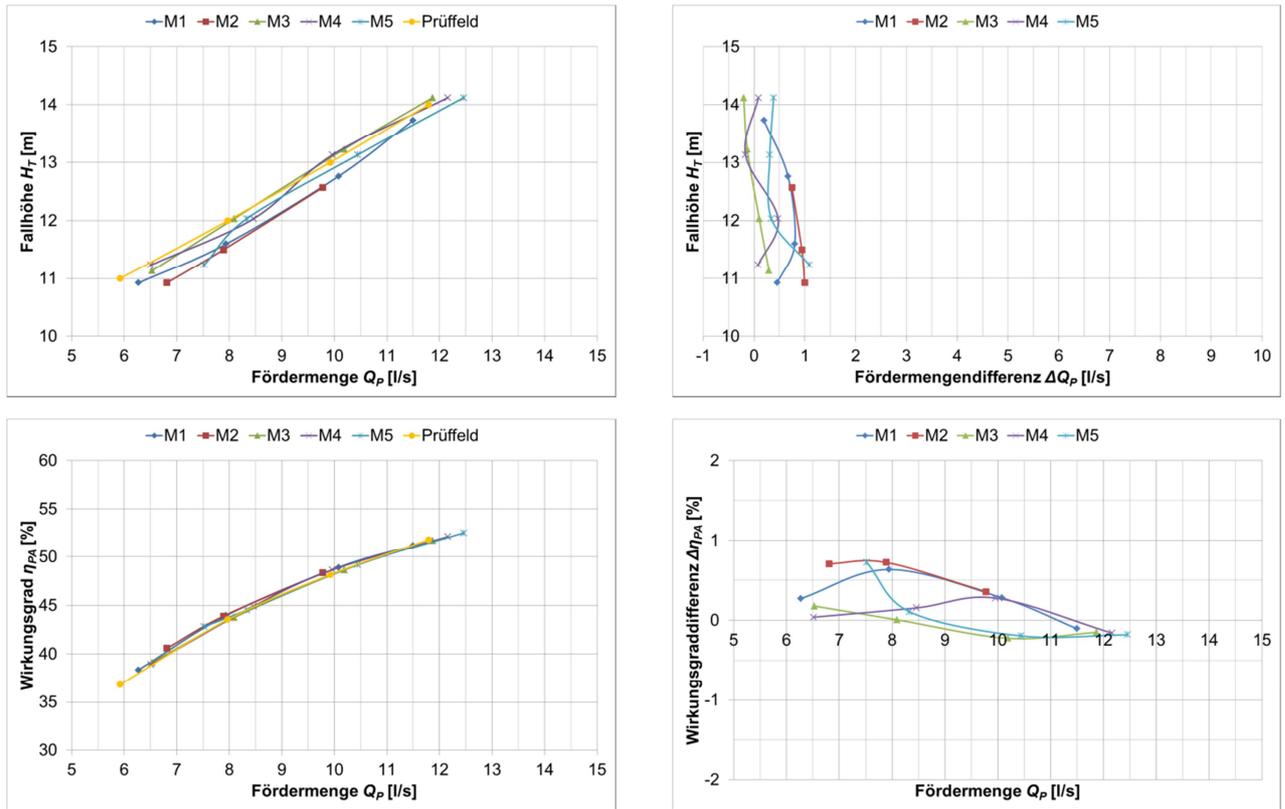


Abbildung 4.12: Jeweils 1 Modul in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der *in-situ* und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte)

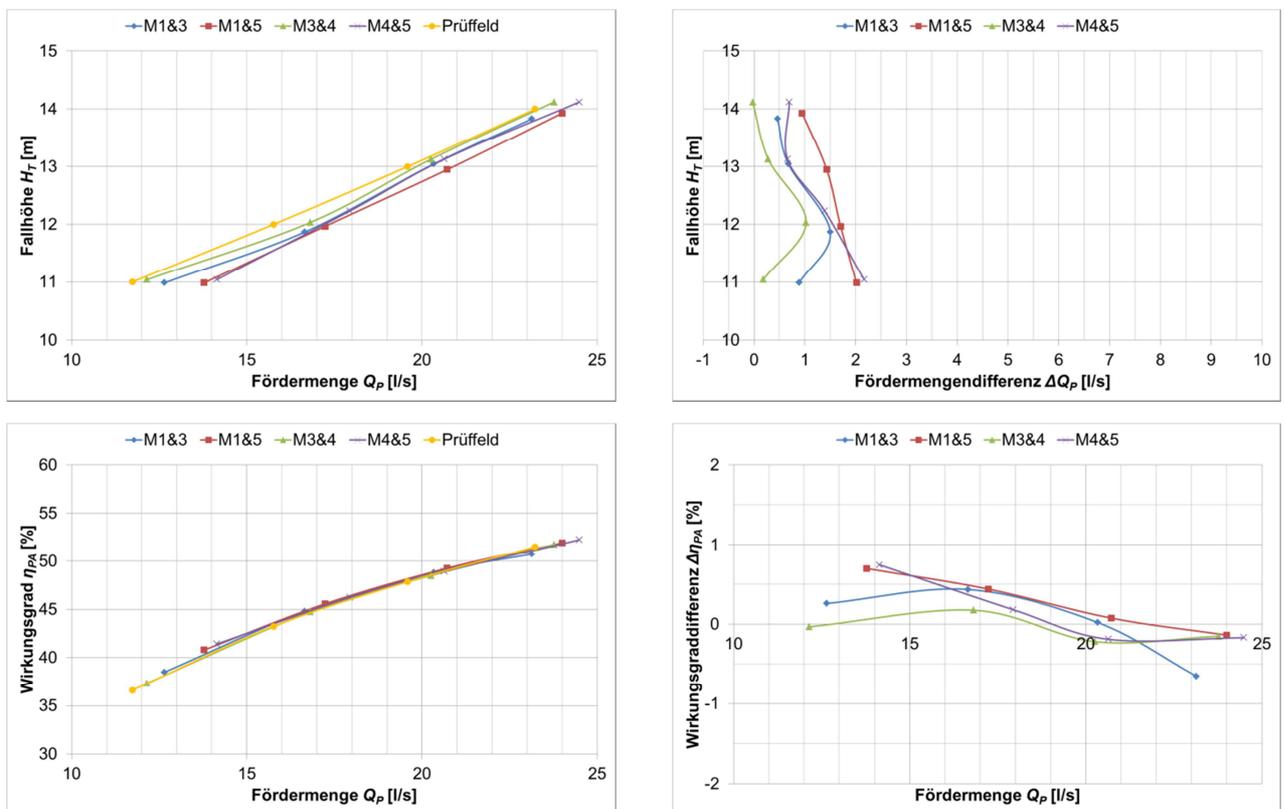


Abbildung 4.13: Jeweils 2 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der *in-situ* und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (recht Spalte)

4.5 Validierung der Förderleistung

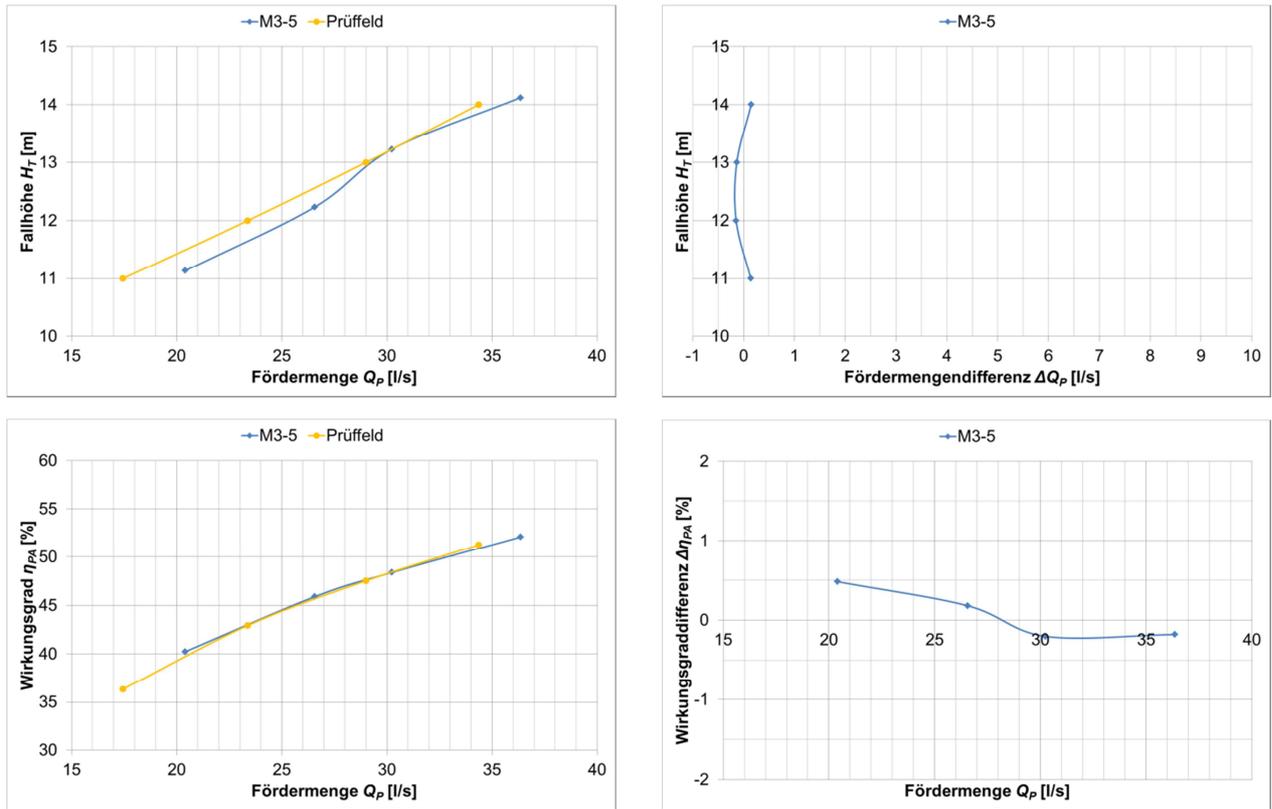


Abbildung 4.14: 3 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der *in-situ* und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (rechte Spalte)

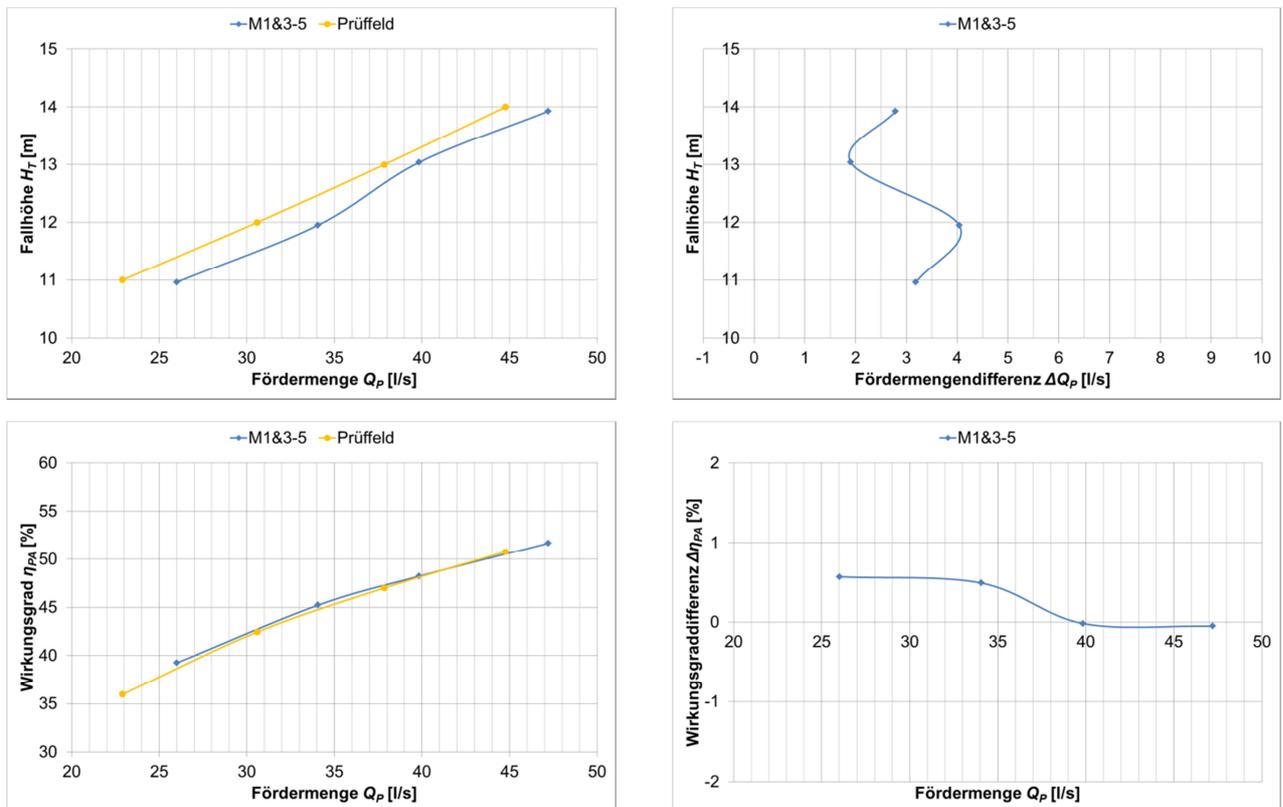


Abbildung 4.15: 4 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der *in-situ* und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (rechte Spalte)

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

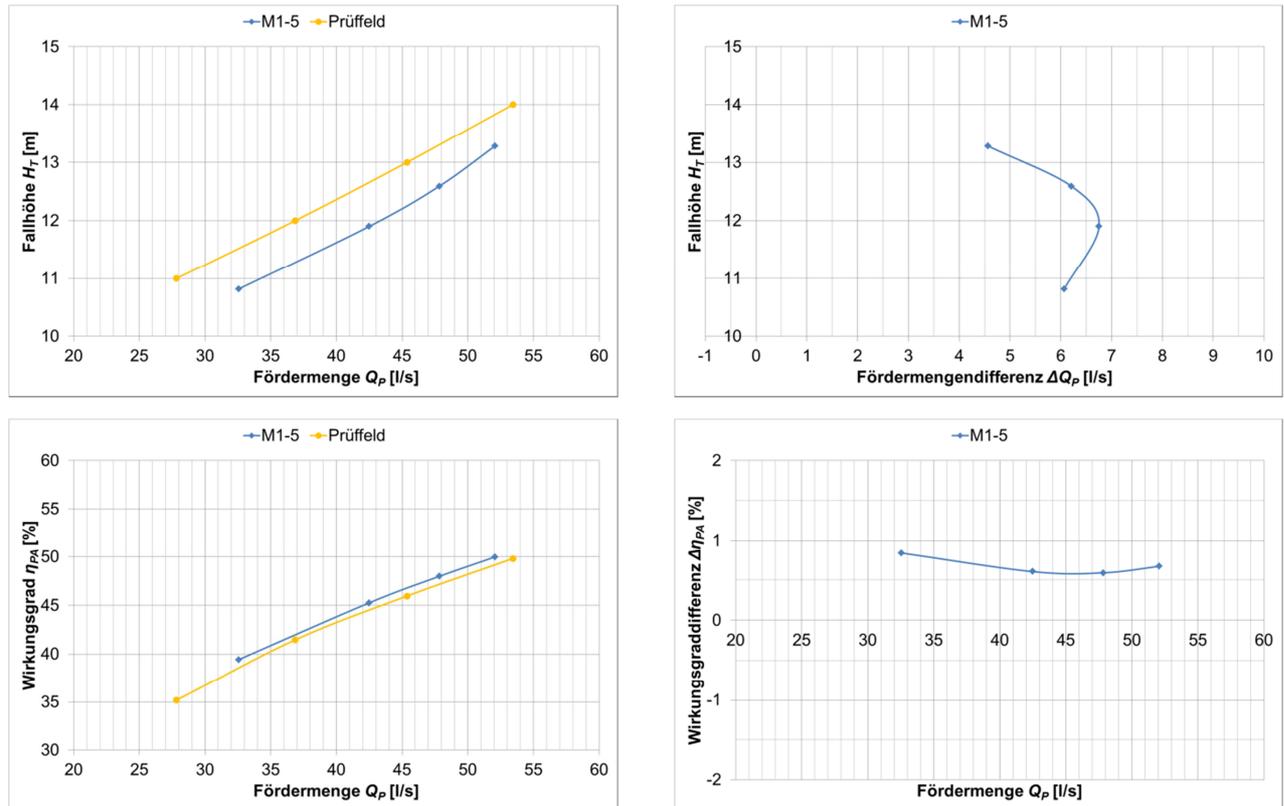


Abbildung 4.16: 5 Module in Betrieb: Fallhöhe und Wirkungsgrad als Funktion der Fördermenge (linke Spalte), Differenz der *in-situ* und auf dem Prüffeld der KSB AG ermittelten Werte (rechte Spalte)

4.5.3 Gesamtbewertung

Um die Förderleistung der Anlage auch über die Messkampagne hinaus im Dauerbetrieb bewerten zu können, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine umfassende Analyse der mithilfe des Kontrollsystems aufgezeichneten Betriebsdaten durchgeführt. Abbildung 4.17 zeigt die Ergebnisse (1) der Prüffeldtests (grüne Kennlinie), (2) der im Jahr 2011 durchgeführten Felduntersuchungen (rote Kennlinie) sowie (3) der Auswertung von Betriebsdaten (blauschwarze Punktwolke), welche seit der Inbetriebnahme der Anlage im Juli 2011 bis Ende Juni 2014 kontinuierlich aufgezeichnet wurden.

Die Kennlinien als Ergebnisse der zuvor beschriebenen Messkampagne wurden wie folgt generiert: Für ein bzw. zwei Module im Betrieb wurden bei den Felduntersuchungen verschiedene Anlageneinstellungen analysiert. Die dabei erzielten Betriebskenngrößen wurden für die Darstellung in Abbildung 4.17 gemittelt.

Insbesondere die neuesten Datenpunkte (Auswertung erfolgte bis Juni 2014) belegen, dass die Wasserförderung seit der Inbetriebnahme mit unverändert hoher Effizienz erfolgt, da weder ein kontinuierlicher noch sprunghafter Rückgang der Leistungskapazität gegenüber den Ergebnissen der Prüfstandversuche bzw. der Felduntersuchungen zu erkennen ist. Es ist lediglich eine Streuung der kontinuierlich aufgezeichneten Messwerte zu erkennen, welche mit sinkender Anzahl betriebener Module zunimmt. In diesem Zusammenhang legen die im vorausgegangenen Kapitel dargelegten Ergebnisse der 2011 durchgeführten Messkampagne die Vermutung nahe, dass die Einzelwirkungsgrade der Maschinen produktionsbedingt variieren und somit zu unterschiedlichen Förderleistungen der einzelnen Module führen.

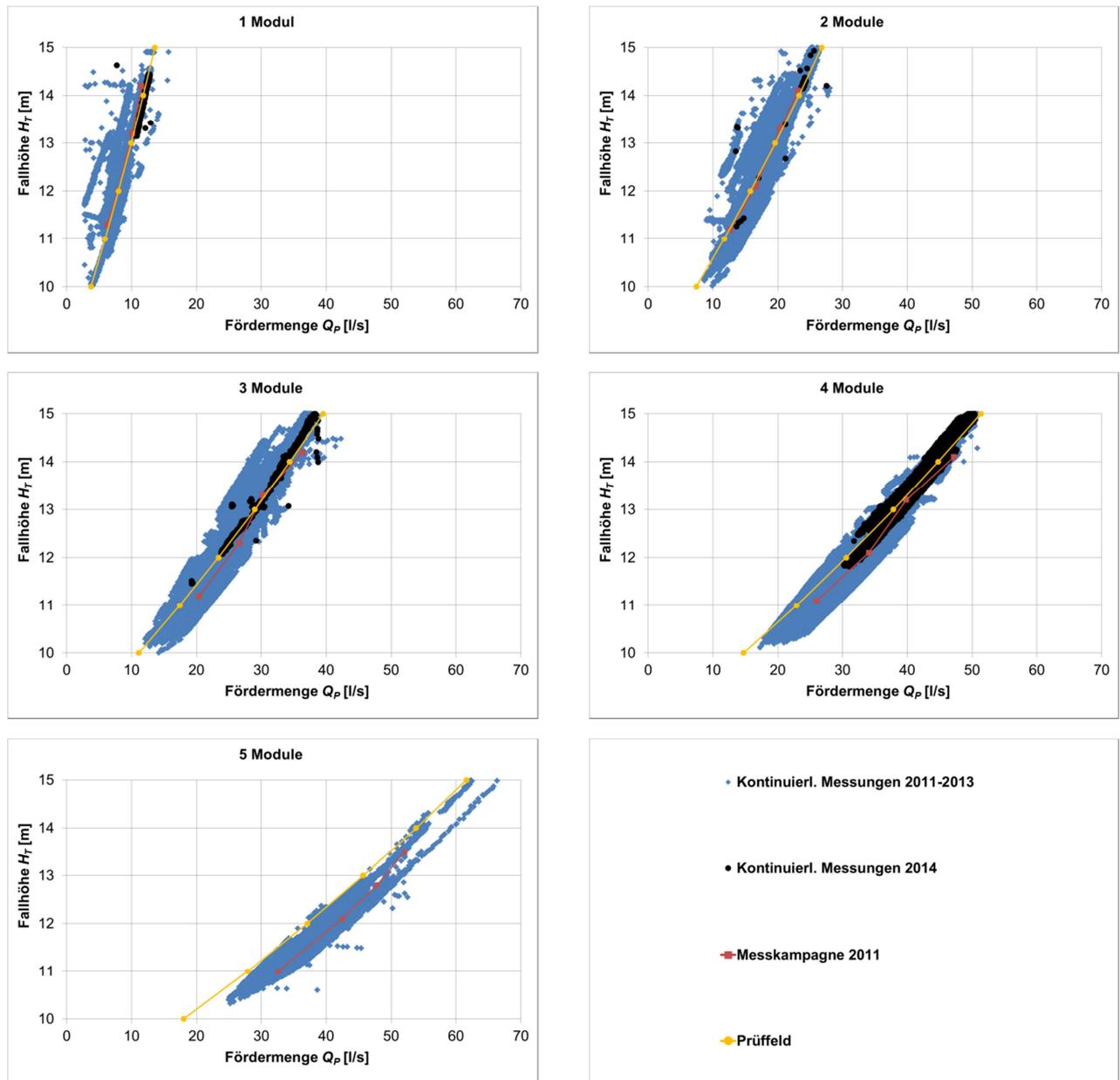


Abbildung 4.17: Förderleistung der Anlage *Bribin* in Abhängigkeit von der Druckhöhe und der Anzahl der Module

In diesem Zusammenhang gilt es zu berücksichtigen, dass der Industriennorm DIN EN ISO 9906-2013-03 zufolge (Abnahmevorschriften für Serienkreispumpen) Unterschiede bzgl. der Betriebskenngrößen einer Maschine zulässig sind. Demzufolge sind bspw. Abweichungen des Wirkungsgrads vom Nennwert von bis zu $\pm 6,1\%$ durch die Abnahmevorschrift gedeckt (der genannte Wert betrifft die in *Bribin* implementierte Maschinenklasse 2; insgesamt gibt es drei Klassen, wobei Klasse 1 die geringsten Abweichungen zulässt). Der genannten Norm zufolge sind Differenzen der Förderraten beim Betrieb unterschiedlicher Module bzw. Modulkombinationen bei konstanter Fallhöhe möglich. Dieser Schluss wird durch die rückläufige Streuung der Messwerte beim Parallelbetrieb mehrerer Module gestützt, da hierbei weniger Kombinationsmöglichkeiten zwischen den Modulen möglich sind. Weiterhin belegt die Auswertung der kontinuierlich aufgezeichneten Daten die zuvor geäußerte Vermutung, dass die Differenz der realen Förderleistung der Module bzw. der Gesamtanlage mit steigender Fördermenge zunehmend über den Werten der Prüffeldversuche liegen.

4.6 Betriebsanalyse

4.6.1 Wasserdargebot

Das Förderpotential der Anlage *Bribin* wird neben der Effizienz und dem technischen Zustand der Maschinen maßgeblich durch die natürliche Abflussvariabilität beeinflusst. Da die Abflüsse aufgrund der anspruchsvollen Bedingungen unter Tage nicht direkt gemessen werden können, wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine auf der *Software Excel Visual Basic for Application* (VBA) basierende Methodik zur Berechnung des Wasserdargebots entwickelt, welche die mittels des Kontrollsystems aufgezeichneten Betriebsparameter Ober-, Unterwasserstand und Fördermenge sowie die Durchflusskennlinien der Anlagenelemente (z.B. Grundablassleitungen usw.) berücksichtigt.

Weiterhin gingen in die Auswertung manuell protokollierte Informationen bzgl. des Öffnungsgrades der Hochwasserentlastungsleitungen ein, welche durch das Betriebspersonal aufgezeichnet wurden. Diese Vorgehensweise wurde als Partizipationsansatz gewählt, um hinsichtlich der kontinuierlichen Datenakquise Verantwortung an das Personal zu delegieren. Auch die Begrenzung des technischen Umfangs des Kontrollsystems auf ein durch die lokalen Betreiber handhabbares Maß war ein weiterer wesentlicher Aspekt zur Wahl dieser Prozedur.

Eine Plausibilisierung der manuellen Aufzeichnungen anhand von Beobachtungen vor Ort sowie ergänzender punktueller Messungen war jedoch erforderlich, um eine fundierte Bewertung der Daten zu ermöglichen. Auch führten zeitweise Engpässe bei der Energieversorgung zu kurzzeitigen Ausfällen des Kontrollsystems und somit zu Lücken in der Datenaufzeichnung, was vorwiegend in der Regenzeit vorkam und dem erhöhten Energiebedarf in Verbindung mit einer verminderten Sonneneinstrahlung (PV-Anlage) geschuldet war. Trotz dieser Einschränkung lässt sich die ganzjährig gemittelte Datenverfügbarkeit im Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2014 auf 92 % beziffern (Trockenzeit 98 %, Regenzeit 86 %). Ermittelt wurden diese Werte durch den Abgleich der aufgezeichneten und verwertbaren Punktmessungen mit dem Sollwert, welcher sich über den Betrachtungszeitraum und das eingestellte Messintervall von zwei Minuten ergibt.

Mithilfe des VBA-Makros konnte somit die Abflussberechnung für die über 20.000 Messwerte pro Monat, einschließlich des Einlesens der Ausgangsdaten sowie der Ausgabe der Berechnungsergebnisse automatisiert werden. Den o.g. Gründen zufolge enthält das Makro zusätzlich eine umfassende Fehleranalyse zur Bewertung der Datengüte. In diesem Zusammenhang wurden weiterhin Handlungsempfehlungen für die künftige Datenaufzeichnung und Auswertung abgeleitet (bspw. eine elektronische Erfassung der Stellsingale der Hochwasserentlastungsarmaturen) und an die indonesischen Betreiber kommuniziert.

Da die berechneten Volumenströme zunächst den Durchfluss durch die Anlage und nicht den realen Abfluss des Karstflusses widerspiegeln, wurden die Änderung des Oberwasserpegels und die damit verbundene Änderung des Stauvolumens mit in die Berechnung einbezogen. Grundlage für die Stauraumbilanzierung waren Ergebnisse von Einstauversuchen, welche im Jahr 2008 durch Mitarbeiter des KIT durchgeführt wurden (Nestmann et al., 2012). Auf Basis der Annahme eines konstanten Zuflusses während der Versuchsreihe konnte anhand der Ergebnisse die Querschnittsfläche der Höhle in Abhängigkeit vom Staupegel näherungsweise ermittelt werden. Da die Annahme eines konstanten Zuflusses jedoch nicht validiert werden konnte, ist die Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse des VBA-Makros mit den realen Abflussmengen mit einer Restunsicherheit behaftet. Da die Einstauversuche im August und Oktober 2008

durchgeführt wurden und in diesen, in der Mitte bzw. am Ende der Trockenzeit gelegenen Monaten für gewöhnlich nur geringe Abflussschwankungen auftreten, werden die Versuchsergebnisse sowie die darauf basierenden berechneten Größen als hinreichend genau angenommen. Eine Validierung der berechneten Abflüsse bzw. eine Verbesserung des Berechnungsansatzes kann durch weitere Einstauversuche bei konstanten Abflussverhältnissen erzielt werden, wonach die daraus gewonnen Ergebnisse in das Makro integriert werden können. Auch dieser Zusammenhang wurde mit dem Betreiber der Anlage diskutiert.

Vor diesem Hintergrund sind in Abbildung 4.18 die gemittelten Monatswerte des Abflusses in *Bribin*, welche im Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2014 ermittelt wurden, dargestellt. Eine unterschiedliche Gewichtung einzelner Monatswerte aufgrund der o.g. sporadischen Datenlücken wurde bei der Auswertung vernachlässigt.

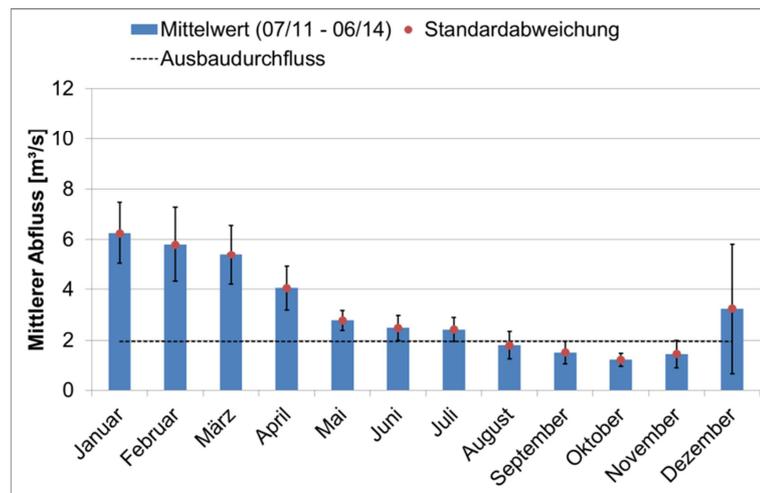


Abbildung 4.18: Auswertung der kontinuierlich aufgezeichneten Daten von Juli 2011 bis Juni 2014: Abflussdargebot des Flusses *Bribin*, gemittelte Monatswerte als Blockdiagramm, Minimal- und Maximalwert des Abflusses als Punktdiagramm, Ausbaudurchfluss der Anlage bei Vollast als gestrichelte Horizontale

Den Ergebnissen zufolge wird der Ausbaudurchfluss für den Vollastbetrieb der Anlage von $1,95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (beim Bemessungsstauziel von 15 m) unter Berücksichtigung der aufgezeigten Standardabweichungen durchschnittlich in 7 Monaten des Jahres überschritten. Das Minimum der Monatsmittelwerte von ca. $1,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ wurde im Oktober ermittelt, was mit dem Ende der Trockenzeit zusammenfällt und durch einen geringen Basisabfluss aufgrund der weitgehenden Entleerung des Karstaquifers während der vorausgegangenen, niederschlagsarmen Monate erklärt werden kann. Auch die Standardabweichung weist in diesem Monat den geringsten Wert auf, da während der Trockenzeit nur sporadische Niederschläge mit geringen Mengen auftreten.

Das Maximum von $6,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entfällt auf den Monat Januar, was für gewöhnlich fast der Mitte der Regenzeit entspricht. Zu diesem Zeitpunkt konnte sich der Aquifer bereits durch häufige und intensive Niederschlagsereignisse teilweise aufsättigen, woraus ein höherer Basisabfluss in Verbindung mit zusätzlichen Abflussspitzen resultiert.

Abbildung 4.18 zeigt weiterhin, dass mittlere Abflussmengen von mindestens $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in drei aufeinanderfolgenden Monaten auftreten (Januar bis März), wobei Spitzenwerten von bis zu $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ erreicht werden. Weiterhin belegen die dargestellten Standardabweichungen insbesondere zu Beginn der Regenzeit eine hohe Abflussvariabilität, welche den Anlagenbetrieb erheblich aufwändiger und anspruchsvoller gestaltet (häufige Neueinstellungen der Anlage

erforderlich). Dies kann durch das Auftreten vereinzelter Starkniederschlagsereignisse in Verbindung mit dem Beginn des Auffüllens des Karstaquifers erklärt werden. Hierdurch ergibt sich ein im Vergleich zu den nachfolgenden Monaten der Regenzeit geringer Basisabfluss mit hohen Abflussspitzen. Mit fortschreitender Dauer der Regenzeit nimmt diese Variabilität aufgrund des zunehmenden Basisabflusses ab.

4.6.2 Anlagennutzungsgrad

Die Abflussanalyse dient im Weiteren als Basis zur Bewertung des Anlagennutzungsgrades, da die ermittelten Abflussmengen einen Abgleich der real betriebenen Anzahl an Modulen mit dem theoretisch möglichen Wert erlaubt. Die theoretische Modulanzahl, welche im Monatsmittel betrieben werden kann, wird auf Basis des vorgegebenen Stauziels (siehe Abbildung 4.9) sowie der auf dem Prüffeld des Herstellers KSB AG ermittelten Maschinenkennlinien berechnet, woraus sich das Schluckvermögen der PAT ableiten lässt. Ebenfalls auf Basis der Maschinenkennlinien sowie unter Verwendung der aufgezeichneten Fördermengen und Fallhöhen wird die reale Anzahl an Modulen berechnet, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. in einem bestimmten Zeitraum betrieben wird.

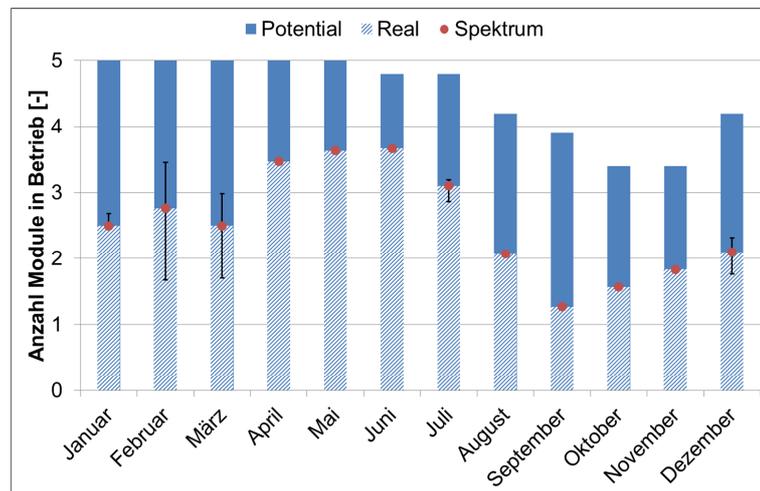


Abbildung 4.19: Potentieller und realer Anlagennutzungsgrad als Funktion der Anzahl von Modulen in Betrieb; erstellt auf Basis der mithilfe des Kontrollsystems generierten Betriebsdaten im Zeitraum Juli 2011 bis Juni 2014

Abbildung 4.19 gibt unter den oben beschriebenen Kennwerten den auf das Bemessungsstauziel von 15 m bezogenen potentiellen und realen Nutzungsgrad der Anlage wieder. Hierbei gilt es zu beachten, dass es sich beim potentiellen Nutzungsgrad um ein theoretisches Optimum handelt, welches durch einen effektiven Anlagenbetrieb angestrebt werden sollte. Die Berechnung der dargestellten Standardabweichungen berücksichtigt aufgrund einer Ergänzung des Datenbestands mithilfe der theoretischen Anlagenleistung zum jeweiligen Zeitpunkt und bei der jeweils gemessenen Fallhöhe Lücken in der Datenaufzeichnung.

Dieser Darstellung zufolge ist eine mittlere theoretische Auslastung der Anlage von 80 % (entspricht 4 Modulen im Dauerbetrieb) in 9 Monaten des Jahres möglich. Während der Regenzeit ist aus theoretischer Sicht im Mittel gar eine Vollauslastung in 5 aufeinanderfolgenden Monaten möglich (Januar bis Mai), sofern Fallhöhen über der drehzahlbasierten zulässigen Betriebsgrenze der Module von 17 m vermieden werden können (siehe Kapitel 4.1). Abbildung 4.19 zufolge wurde weiterhin das geringste theoretische mittlere Förderpotential im Monat

Oktober ermittelt, was mit dem Ende der Trockenzeit sowie dem im vorausgegangenen Kapitel benannten Abflussminimum einhergeht. Da zu dieser Zeit ein erhöhter Wasserbedarf der lokalen Bevölkerung gegeben ist drängt sich die Frage auf, ob es eine Schwachstelle des Förderkonzeptes ist, dass gerade zu dieser Zeit die geringsten Fördermengen des Jahres realisiert werden. Die Antwort ist ein klares *Nein*, da sich die geringeren Fördermengen zwangsläufig durch den Rückgang der Abflussmengen während der Trockenzeit ergeben. Die Nutzung des Abflussdargebots erfolgt aber stets mit möglichst hoher Effizienz, wonach eine höhere, wasserkraftbasierte und somit nachhaltige Förderrate nicht realisierbar ist. So können auch zu Zeiten des geringsten Wasserdargebots durchschnittlich mehr als 3 Module parallel betrieben werden (kontinuierlicher Betrieb von 3 Modulen, intermittierender Betrieb eines vierten Moduls), wodurch beim Bemessungstauziel von 15 m bis zu 45 l s^{-1} gefördert werden können.

Die relative Auslastung der Anlage (Anzahl real betriebener Module bezogen auf den theoretisch möglichen Wert) variiert zwischen 32 % (September) und 76 % (Juni) mit einem ganzjährigen Durchschnitt von 56 %. Zwischen Regen- (55 %) und Trockenzeit (57 %) wurde lediglich ein vernachlässigbarer Unterschied ermittelt. Bei der Bewertung der genannten Werte gilt es folgende Rahmenbedingungen zu berücksichtigen:

- Die „Lernkurve“ des Betriebspersonals führte in der Anfangsphase erwartungsgemäß zu einem geringeren Anlagennutzungsgrad (53 % im ersten Betriebsjahr) im Vergleich zu späteren Zeiträumen (54% im zweiten und 64 % im dritten Betriebsjahr). Wird das personell bisher unveränderte Betriebsteam weiterbeschäftigt, sind aufgrund der bereits gewonnenen Betriebserfahrung in Zukunft gar höhere Werte zu erwarten (eine angemessene Instandhaltung und Betriebsweise vorausgesetzt).
- Bedingt durch die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen konnten teils wochenlange Standzeiten einzelner Module sowie zeitweise auch der Gesamtanlage nicht vermieden werden. Hierdurch wurde der reale Nutzungsgrad verringert, wovon insbesondere die Werte von September und Oktober betroffen sind, da dieser Zeitraum aufgrund der typischen geringen Abflüsse für eine Ausführung der Baumaßnahmen besonders geeignet war. Nach aktuellem Kenntnisstand (Stand August 2015) sind zur Gewährleistung des nachhaltigen Anlagenbetriebs keine weiteren übergeordneten Maßnahmen erforderlich, wonach der Nutzungsgrad während der betroffenen Monate künftig erhöht werden kann.
- Da die Kapazität des Fördersystems und des ursprünglichen Entlastungssystems nicht ausreichten zur Abführung der auftretenden Wassermengen durch das Sperrwerk, musste die Anlage vor der Installation des hydraulischen Bypasses (siehe Kapitel 4.7) zeitweise (insbesondere in den Monaten Februar und März) wegen Überschreitung des zulässigen Betriebsbereichs abgeschaltet werden. Durch die Implementierung des Bypasses können die abflussbedingten Standzeiten aufgrund der schnelleren Senkung des Staupegels künftig auf ein hinnehmbares Maß reduziert werden.

Weiterhin konnte im Rahmen der Betriebsdatenanalyse gezeigt werden, dass im Betrachtungszeitraum (Juli 2011 bis Juni 2014) in der Regenzeit mehr als doppelt so viele Regelungsvorgänge (Öffnen/Schließen der Hochwasserentlastungsleitungen, Starten/Stoppen der Module) im Vergleich zur Trockenzeit erforderlich waren (siehe Abbildung 4.20). Die primäre Einflussgröße ist hierbei die in Abbildung 4.18 dargelegte Abflussfluktuation.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Mithilfe dieser Regelungsvorgänge sollte der zum jeweiligen Zeitpunkt gültige Betriebsbereich („Stauziel $\pm 0,5$ m“) möglichst dauerhaft eingehalten werden. Wie in Abbildung 4.20 zu erkennen ist wurde diese Vorgabe jedoch nur eingeschränkt befolgt, da lediglich 45 % des Gesamtbetriebs der Anlage auf den vorgegebenen Betriebsbereich entfallen. Weiterhin sind in Abbildung 4.21 die Anteile von vier unterschiedlichen Betriebsbereichen gesondert für die Trocken- und Regenzeit sowie jeweils aufgeschlüsselt in die ersten drei Betriebsjahre dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass der vorgegebene Betriebsbereich mit zunehmender Betriebsdauer seltener eingehalten wurde. Dies lässt darauf schließen, dass (1) die erforderlichen Kenntnisse in Bezug auf die Anlagenregelung zwar umfassend an das Betriebspersonal vermittelt werden konnten, (2) mit zunehmender Übernahme der betrieblichen Verantwortung jedoch ein großzügigerer Regelungsbereich angewandt wurde. Ob dieses den Vorgaben der für den Betrieb zuständigen Behörde oder der Selbstbestimmung des Betriebspersonals geschuldet war, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht abschließend geklärt werden.

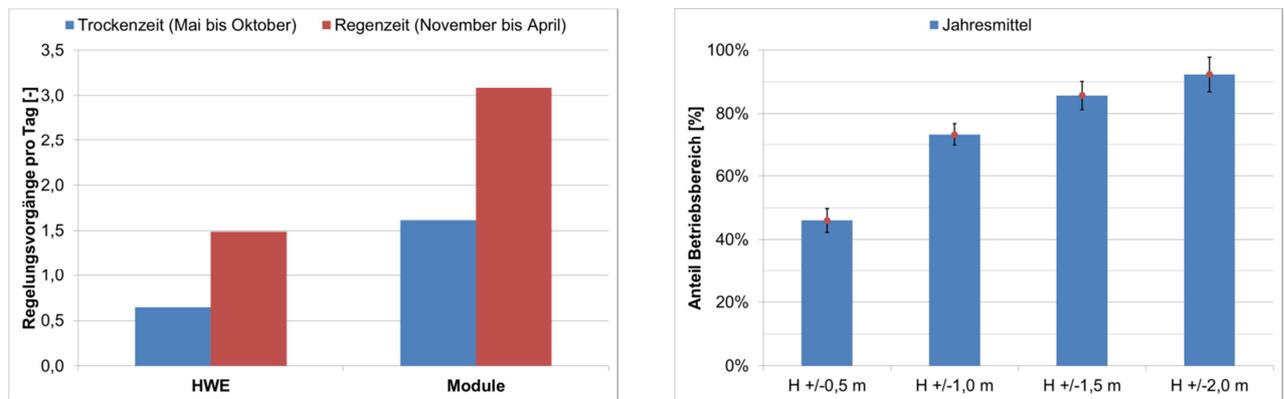


Abbildung 4.20: Mittlere Anzahl an Regelungsvorgängen am Hochwasserentlastungssystem (HWE) und an den Modulen (links), Anteile verschiedener Betriebsbereiche (rechts); Betrachtungszeitraum jeweils Juli 2011 bis Juni 2014

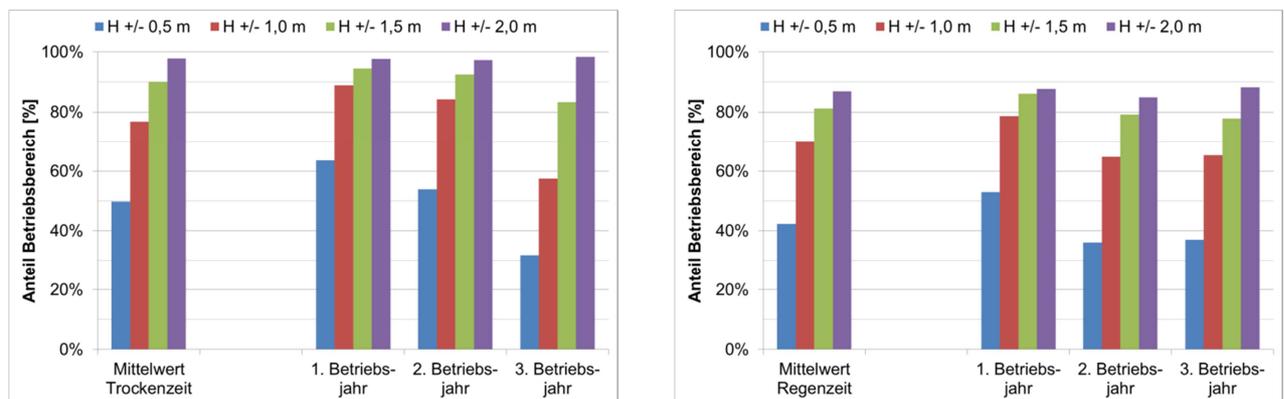


Abbildung 4.21: Anteile verschiedener Betriebsbereiche in Trocken- (links) und Regenzeit (rechts), einschließlich der Entwicklung über den gesamten Betrachtungszeitraum von Juli 2011 bis Juni 2014

Trotz dieser Abweichung kann die Betriebsanalyse jedoch überaus positiv bewertet werden, da über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg der Anteil des Betriebsbereichs „Stauziel ± 2 m“ zu 97,8 % in der Trockenzeit bzw. zu 86,9 % in der Regenzeit eingehalten wurde. Weiterhin muss in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden, dass eine Überschreitung des zulässigen Betriebsbereichs zeitweise auch auf extreme Abflussereignisse zurückgeführt werden kann, wonach die Einhaltung der Betriebsgrenzen trotz umgehender Reaktion des

Betriebspersonals technisch nicht realisierbar ist. Bestätigt wird diese Einschränkung durch den Anteil des Betriebsbereichs „Stauziel ± 2 m“, welcher im Mittel mehr als 90 % der Gesamtbetriebsdauer im Betrachtungszeitraum einnimmt, wonach extreme Abweichungen nur selten und zeitlich begrenzt aufgetreten sein können.

4.6.3 Förderpotential und mittlere Förderrate

Die dargelegte kontinuierliche Erhöhung des Anlagennutzungsgrades innerhalb der ersten drei Betriebsjahre in Verbindung mit der sukzessiven Erhöhung des zulässigen Betriebsbereichs (siehe Kapitel 4.4.2) führte zu einer Anhebung der mittleren jährlichen Förderrate von ca. 20 l s^{-1} (im ersten Betriebsjahr) auf ca. 24 l s^{-1} (im dritten Betriebsjahr). Da diese Werte auf einen Betrieb rund um die Uhr bezogen sind, konnte somit die jährliche Gesamtfördermenge von ca. 623.000 m^3 (im ersten Betriebsjahr) auf ca. 744.000 m^3 (im dritten Betriebsjahr) erhöht werden.

Die potentielle sowie die reale mittlere Jahresförderrate ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Wenngleich der potentielle Wert ein theoretisches Optimum für den Anlagenbetrieb darstellt, so kann durch (1) langfristige Beschäftigung von erfahrenem Betriebspersonal sowie (2) durch sachgemäße Wartung der Maschinen eine Annäherung der realen Förderrate an diesen Wert angestrebt werden. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass bereits in den ersten drei Betriebsjahren eine sukzessive Erhöhung der realen Jahresförderrate erreicht wurde. Auch künftig sind weitere Steigerungen der mittleren realen Jahresförderrate zu erwarten, wodurch eine Obergrenze für diesen Wert bislang (Stand August 2015) nur näherungsweise und auf Basis der bereits gewonnenen Betriebserfahrung wie folgt definiert werden kann.

Da im Laufe des Jahres regelmäßige Wartungsarbeiten an den Maschinen durchgeführt werden müssen, muss den bislang gewonnenen Erfahrungen zufolge eine Standzeit der Anlage von einem Monat pro Jahr angenommen werden. Diese Arbeiten sollten sinnvollerweise am Ende der Regenzeit durchgeführt werden (bspw. im Juni), um die Funktionsfähigkeit der Anlage während der Trockenzeit bzw. der Zeit des höchsten Versorgungsbedarfs in der Bevölkerung sicherstellen zu können. Weiterhin wird in den Monaten Juli bis Dezember die Zahl der Module, welche gemäß den mittleren monatlichen Abflussmengen betrieben werden könnten, um eines reduziert. Hierdurch sollen Effizienzeinbußen durch Fehlbedienungen seitens des Betriebspersonals berücksichtigt werden. In den Monaten Januar bis Mai können erfahrungsgemäß alle 5 Module betrieben werden, wodurch lediglich Regelungsvorgänge am Hochwasserentlastungssystem erforderlich sind. In diesen Monaten wird für die Berechnung das volle Förderpotential angenommen, wenngleich dies die Einhaltung des zulässigen Betriebsbereichs voraussetzt.

Tabelle 4.5: Real ermittelte mittlere Förderrate in Abhängigkeit der Anzahl von Modulen in Betrieb

Anzahl Module in Betrieb [-]	1	2	3	4	5
Mittlere Förderrate bei Stauziel 15 m [l s^{-1}]	13,6	26,8	39,5	51,3	61,6

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 4.5 dargelegten Förderraten beim Bemessungsstauziel von 15 m beträgt die resultierende realisierbare mittlere Jahresförderrate ca. 42 l s^{-1} (entspricht 80 % des theoretischen mittleren jährlichen Förderpotentials von $52,5 \text{ l s}^{-1}$, jeweils beim Bemessungsstauziel betrachtet) um 20 %. Basierend auf einer Fortführung der kontinuierlichen Evaluation des Anlagenbetriebs kann in den Folgejahren diese Abschätzung weiter an die Realität angepasst werden.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

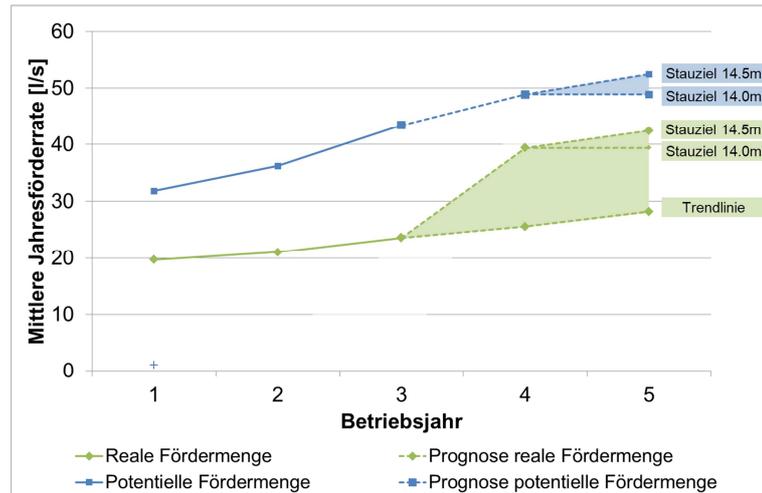


Abbildung 4.22: Vergleich der realen und potentiellen mittleren Jahresförderrate (Betrachtungszeitraum Juli 2011 bis Juni 2014 für die ersten drei Betriebsjahre)

Erwartungsgemäß wurden im Rahmen der Analyse der Förderleistung bzw. des Förderpotentials zeitweise Differenzen zwischen Ist- und Sollzustand ermittelt. Mögliche Ursachen wurden eingehend mit den indonesischen Betreibern diskutiert, um künftig einen optimierten Anlagenbetrieb zu ermöglichen. Gründe waren bspw. das insbesondere zu Beginn des Dauerbetriebs mangelnde Bewusstsein der indonesischen Betreiber im Hinblick auf die Einhaltung erforderlicher Wartungszyklen. Die Folge waren i.d.R. vermeidbare technische Probleme bzw. Schadensfälle am Fördersystem, welche zu Standzeiten einzelner Module und somit zu einer Minderleistung der Anlage führten. Durch weiterführende Schulungen von Seiten des KIT sowohl für das Betriebspersonal als auch für die übergeordneten Verantwortlichen konnte das Verständnis für die Notwendigkeit dieser technischen Dienstleistungen geschaffen werden (siehe Kapitel 4.4.1). Ein Schwerpunkt dieser *Capacity-Development*-Maßnahmen lag auf der Beantragung bzw. Bereitstellung eines jährlichen Budgets zur Durchführung des Regelbetriebs und der erforderlichen Wartungsarbeiten durch die indonesischen Betreiber.

4.7 Erweiterung des Hochwasserentlastungssystems (M4)

Unter Berücksichtigung der hohen Abflussvariabilität des Karsthöhlensystems *Bribin*, der zu Beginn des Vorhabens lückenhaften Datenbasis sowie einer zeitlichen Begrenzung in Bezug auf weiterführende Untersuchungen des Abflussdargebots war die Auslegung der Anlage im Hinblick auf den Ausbaudurchfluss der PAT und die Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastung mit Restunsicherheiten behaftet. Auch eine statistische Einordnung der zum Planungszeitpunkt vorliegenden Daten war aufgrund fehlender Zeitreihen nicht möglich.

Nach kritischer Analyse der vor Ort verfügbaren Daten (punktuelle Beobachtungen über einen Zeitraum von 20 Jahren) und einem Abgleich mit Erkenntnissen, welche durch Mitarbeiter des KIT gewonnen wurden (3 Jahre kontinuierliche Messungen, Interpretation hydromorphologischer Ausprägungen), wurde angenommen, dass die Mindestabflussmenge auch während der Trockenzeit i.d.R. einen Wert von $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nicht unterschreitet und die Abflussspitzen während der Regenzeit bei maximal $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ liegen. Somit wurden zwei Grundablässe in die Anlage integriert, um bei Überschreitung des Ausbaudurchflusses des WPS die überschüssigen Wassermengen durch das Sperrwerk ableiten zu können.

4.7 Erweiterung des Hochwasserentlastungssystems (M4)

Die Durchflusskapazität des Entlastungssystems wurde zunächst auf ca. $8,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ festgelegt (bzgl. $H_T = 15 \text{ m}$) und enthielt somit gegenüber den angenommenen Maximalabflüssen einen Sicherheitszuschlag. Weiterhin wurde aufgrund der bei Höhlenbegehungen gewonnenen Erkenntnisse angenommen, dass bei einer Überschreitung der Bemessungstauhöhe im Stauraum eine Entlastung über eine bekannte Seitenhöhle (*Gua Ngreneng*) erfolgt.

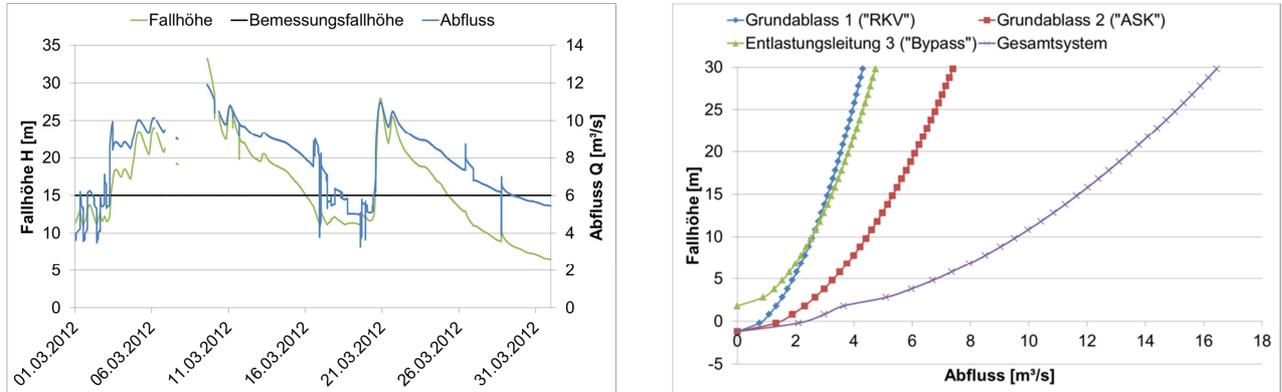


Abbildung 4.23: Überschreitung der Bemessungstauhöhe infolge extremer Abflussereignisse im März 2012 (links), Erweiterung der Durchflusskapazität des Hochwasserentlastungssystems²⁷ im Vergleich zum in Abbildung 4.3 dargestellten ursprünglichen Zustand (rechts)

In der Regenzeit 2011/2012 führten jedoch unerwartet hohe Abflüsse zeitweise zu Stauhöhen von über 30 m und somit zur Überschreitung der Bemessungsgrenze des Sperrwerks (siehe Abbildung 4.23). Zu dieser Zeit wurden Abflussspitzen von über $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ gemessen sowie mehrtägig hohe Abflüsse über $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Die Erweiterung des Hochwasserentlastungssystems zur Sicherung des nachhaltigen Anlagenbetriebs war somit unerlässlich (vierte Anpassungsmaßnahme des Anlagenkonzeptes, **M4**). Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit weiteren Teilprojekten des IWRM-Verbunds die Machbarkeit folgender Konzepte überprüft:

- (1) Ein Umgehungsstollen, welcher automatisch bei Überschreitung der maximal zulässigen Stauhöhe von 15 m anspringt. Dieser wurde aufgrund des erheblichen baulichen Aufwands, der inhomogenen Geologie des Karstgebirges sowie der mangelnden Kontrollierbarkeit verworfen
- (2) Eine Aufweitung der Seitenhöhle *Gua Ngreneng*. Auch diese Option wurde aufgrund der unklaren Durchflusskapazität und der ebenfalls mangelnden Kontrollierbarkeit nicht umgesetzt
- (3) Der Austausch der beiden Grundablassarmaturen durch Modelle mit höherer Durchflussleistung. Da dies gleichermaßen einen Austausch der Rohrschüsse bedingen würde, welche in die Maschinenplattform sowie in das Betonsperrwerk integriert wurden und somit nicht ausgetauscht werden können, wurde dieser Ansatz ebenfalls verworfen.
- (4) Realisiert wurde die Kapazitätserhöhung letztlich durch die Integration eines hydraulischen Bypasses in eines der bestehenden Fördermodule (siehe Abbildung 4.24).

²⁷ Die beiden Grundablässe sind nach den eingesetzten Regelarmaturen bekannt (RKV bedeutet Ringkolbenventil, ASK bedeutet Absperrklappe).

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Die Bemessung dieses Bypasses wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation begleitet und erfolgte dahingehend, dass das Modul im Regelbetrieb weiter zur Wasserförderung und im Falle hoher Abflussmengen zur Hochwasserentlastung genutzt werden kann. Das Umschalten zwischen den beiden Funktionen sollte durch Öffnen und Schließen zweier Armaturen, welche in das PAT-Druckrohr sowie in den Abzweig zur PAT integriert sind, manuell von Seiten des Betriebspersonals erfolgen. Um im Falle hoher Abflüsse das Risiko einer Überflutung der Plattform von der Unterwasserseite aufgrund des pegelabhängigen Schluckvermögens des unterstrom gelegenen Siphons zu reduzieren, wurde zusätzlich eine Erhöhung der unterwasserseitigen Schutzmauer umgesetzt.

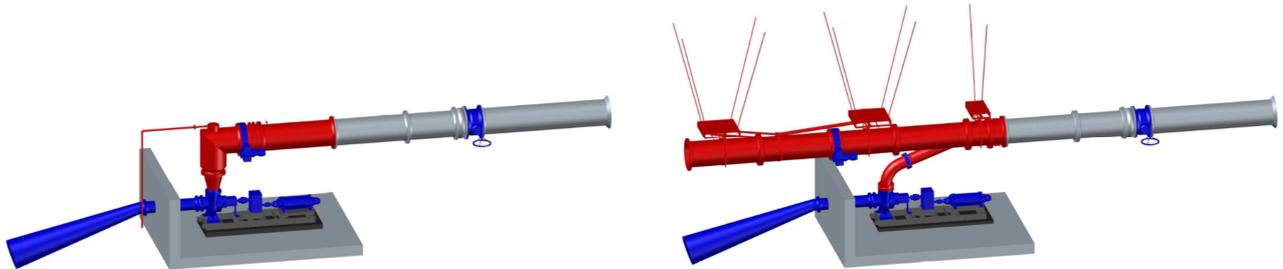


Abbildung 4.24: 3D-CAD-Modell von Modul 3 vor (links) und nach (rechts) Umsetzung der Umbaumaßnahme (rot: zu verändernde bzw. veränderte Komponenten) (Mastaller 2013)

Bei der hydraulischen Optimierung wurden verschiedene Szenarien betrachtet, da die Modulauswahl gleichermaßen den Rohrdurchmesser des Bypasses bestimmt (die Module 1 und 2 sind mit einem PAT-Druckrohr DN 450, die Module 3 bis 5 mit einem Druckrohr DN 700 ausgestattet, siehe Kapitel 4.1). Demzufolge wurde sowohl der Umbau einer „großen“ als auch der beiden „kleinen“ Druckleitungen in Betracht gezogen. Neben der realisierbaren Erhöhung der Durchflusskapazität des Entlastungssystems waren der zu erwartende technische und finanzielle Aufwand bei der Umsetzung wichtige Entscheidungskriterien in der Planungsphase.

Im Rahmen der hydraulischen Dimensionierung konnte nachgewiesen werden, dass der Umbau einer DN 700-Leitung aufgrund des größeren Durchmessers eine höhere Durchflussleistung ermöglicht als die beiden DN 450-Leitungen zusammen. Auch wurde der Aufwand beim Umbau zweier Module aus technischer und finanzieller Sicht als erheblich höher eingeschätzt als bei der Änderung eines einzelnen Moduls (wenngleich bei größerem Rohrdurchmesser). Da weiterhin eine Wirkungsgradreduzierung des veränderten Moduls nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte, entfiel letztlich die Entscheidung auf den Umbau eines „großen“ Moduls. In diesem Zusammenhang bot Modul 3 (siehe Abbildung 4.1) den Vorteil, dass es nahezu im Zentrum der Höhle installiert wurde und an dieser Position die maximale Höhe der Höhlendecke sowie die maximale Tiefe im Unterwasserbereich ermittelt wurde. Da der Wasserstrahl tendenziell als Freistrahle aus dem Bypass austreten und nicht ins Unterwasser eingeleitet werden sollte, boten diese geometrischen Bedingungen erhebliche Vorteile, um eine Interaktion mit der Höhlenwandung (Rückstoßeffekt von der Höhlendecke bzw. Auskolkung an der Flusssohle) möglichst vermeiden zu können. Im Sommer 2012 wurde das theoretisch ausgearbeitete Konzept mittels eines wasserbaulichen Modellversuchs im Theodor-Rehbock-Laboratorium (TRL) des IWG vor der anschließenden Implementierung in der Anlage *Bribin* optimiert. Ziel der Versuche war die Umsetzung einer optimierten Energiedissipation sowie einer ausreichenden Strahlweite, um so die o.g. Erosionserscheinungen im Flussbett in Anlagennähe vermeiden zu können, wobei eine ausreichende Durchflusskapazität gewährleistet werden sollte.

Eine der maßgeblichen Herausforderungen bei der baulichen Umsetzung bestand darin, die bei Aktivierung des Bypasses auftretenden statischen und dynamischen Lasten abzutragen, ohne, dass die zulässige Stutzenlast der PAT von ca. 1.000 kg überschritten wird. Da aus Platzgründen eine Verankerung in der Höhlendecke gegenüber einer Abstützung zur Maschinenplattform hin bevorzugt wurde, erfolgte die Entwicklung eines geeigneten Aufhängungssystems in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Boden- und Felsmechanik (IBF) des KIT. Dieses Befestigungssystem sollte primär die Ableitung von Axial- und Querkräften über Felsanker in das über der Anlage befindliche Karstgestein ermöglichen. Zusätzlich wurde das PAT-Druckrohr mit einem Polymer-Kompensator ausgestattet, um eine Übertragung von Schwingungen vom Druckrohr zur PAT vermeiden zu können.

Die bauliche Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit der indonesischen Betreiberbehörde PU sowie mit Unterstützung indonesischer Anlagenbauer. Nach erfolgreichem Abschluss der Baumaßnahmen wurde die Funktion des hydraulischen Bypasses bei unterschiedlichen Stauhöhen vollständig validiert. So wurde eine Erhöhung der Durchflusskapazität des Entlastungssystems um fast 40 % erreicht (siehe Abbildung 4.23). Dieser Wert bezieht sich sowohl auf die maximal zulässige Stauhöhe von 15 m als auch auf ein Niveau von 20 m, welches für die Aktivierung des Bypasses gewählt wurde (siehe Kapitel 4.9). Hierbei wurde berücksichtigt, dass bei Aktivierung des Bypasses Schwingungen ins Gebirge übertragen werden und mögliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Sickerwassermengen nicht abgeschätzt werden können. Eine zu häufige Betätigung des Bypasses sollte daher vermieden werden. Gleichzeitig musste jedoch die Standsicherheit des Sperrwerks gewährleistet werden, wonach die Aktivierung des Bypasses nicht zu spät erfolgen sollte.

Bereits im Vorfeld wurde von Seiten des KIT festgestellt, dass die unerwartet hohen Abflüsse in der Regenzeit zu Stauhöhen deutlich über 20 m und somit zu unzulässig hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Grundablassleitungen führen. Deshalb wurde im Zuge der Implementierung des Bypasses auch eine der beiden Grundablassarmaturen durch ein Modell höherer Nenndruckstufe (von PN 10 auf PN 16) ausgetauscht (gleichbedeutend mit höherer Widerstandsfähigkeit gegenüber strömungsgeschwindigkeitsinduzierter Belastung wie Kavitation), um eine dauerhafte Gewährleistung der Anlagensicherheit sicherzustellen.

4.8 Anpassung des Injektions- und Drainagesystems (M5)

Die Erweiterung der Durchflusskapazität des Hochwasserentlastungssystems ermöglicht die Vermeidung unzulässig hoher Staupegel, was eine bedeutende Errungenschaft u.a. in Bezug auf die Begrenzung der Sickerwassermengen am Sperrwerk *Bribin* darstellt. Aufgrund der Lage im Untergrund ist der Stauraum durch die Höhlenwandungen begrenzt, welche während des Anlagenbetriebs mit hydrostatischem Druck beaufschlagt werden. Dieser Druck führt vor dem Hintergrund der Porosität des Kalkgesteins zur Infiltration einer Teilmenge des Höhlenabflusses. Basierend auf umfassenden geotechnischen, mineralogischen und hydraulischen Untersuchungen im Rahmen des Vorgängerprojektes wurde jedoch davon ausgegangen, dass diese Teilmenge im Vergleich zum Gesamtabfluss sehr gering ist. Deshalb wurde die Stauhaltung langfristig als möglich erachtet.

In Zusammenarbeit mit weiteren Teilprojekten des IWRM-Verbundes wurde das im (Langzeit-) Betrieb der Wasserförderanlage *Bribin* auftretende Sickerwasser kontinuierlich gemessen und untersucht. Gegenstand der Untersuchungen war die Analyse der Korrelation zwischen

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

auftretender Menge und Stauhöhe sowie die räumliche Verteilung. Die hierfür erforderliche Datenbasis wurde mithilfe des entwickelten Kontrollsystems geschaffen (siehe Kapitel 4.3.3). Ziele dieser Analysen waren die Ableitung von Betriebsstrategien (siehe Kapitel 4.9) sowie zielgerichteter Injektions- und Drainagemaßnahmen zur Reduzierung und kontrollierten Abführung des Sickerwassers. Die Implementierung eines Injektions- und Drainagesystems stellt die fünfte Anpassung (**M5**) des Anlagenkonzeptes dar.

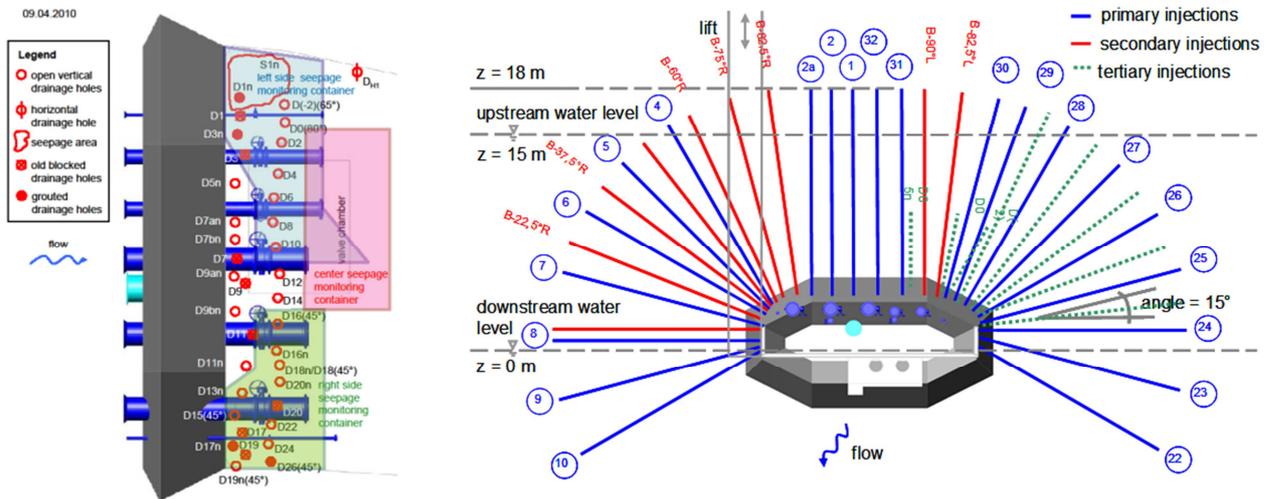


Abbildung 4.25: Schema des Drainage- (links) und Injektionssystems (rechts)²⁸ in Bribin

Da das Sickerwasser auf der Luftseite des Sperrwerks oberhalb der Anlagenplattform zu Tage tritt, wurde ein Injektionsschirm radial zum Sperrwerk mit einer Neigung von 15° gegen die Strömungsrichtung implementiert, um das Wasser am Durchströmen des umgebenden Gesteins zu hindern (Mutschler und Triantafyllidis, 2009). Hierzu wurden Bohrungen von 15 m Tiefe²⁹ in das Karstgestein eingebracht (siehe Abbildung 4.25) und anschließend unter Hochdruck mit einer Betonemulsion verfüllt. Hierbei wurden durch ein Teilprojekt des IWRM-Verbundes speziell für diese Anwendung entwickelte Injektionsmaterialien auf Basis lokal verfügbarer Ausgangsstoffe auf deren Praxistauglichkeit hin untersucht und vor Ort erprobt (Breiner et al., 2011). Zusätzlich zum Injektionsschirm wurde ein Drainagesystem auf der Unterwasserseite des Injektionsschirms errichtet, welches durch 6 m tiefe Bohrungen eine kontrollierte Abführung und somit eine Reduzierung des Drucks des im Gebirge anstehenden Sickerwassers ermöglichen soll.

Zwischen 2009 und 2013 erfolgten durch den Betreiber der Anlage Bribin unter kontinuierlicher Begleitung durch Mitarbeiter des IWRM-Verbundes insgesamt drei Injektionskampagnen. Im Rahmen dieser Injektionskampagnen konnten wichtige Erkenntnisse zur Durchführung und Nachhaltigkeit von Abdichtungsmaßnahmen in verkarsteten Felsuntergründen im Zusammenhang mit unterirdischen Wasserspeichern gewonnen werden. Durch die dauerhafte Verringerung der auftretenden Sickerwassermengen auch unter extremen Druckbelastungen während der Hochwasserereignisse in den Regenzeiten 2011/2012 und 2012/2013 konnte gezeigt werden, dass dieses angepasste Injektionskonzept eine zuverlässige und kostengünstige Lösung im Hinblick auf den langfristigen Betrieb der Anlage Bribin darstellt. Die bislang erfolgten Injektionskampagnen (Stand August 2015) werden nachfolgend umrissen.

²⁸ Abbildungen des Instituts für Boden- und Felsmechanik (IBF), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

²⁹ Da die Höhlendecke ca. 3 m über der horizontalen Bezugsebene des Referenzsystems der Anlage Bribin befindet, entspricht dies einer Höhe von ca. 18 m.

- **1. Injektionskampagne (April bis Mai 2009):** Das Konzept wurde mit dem Ziel einer Reduzierung der Tropfwassermengen über den gesamten Höhlenquerschnitt auf Basis punktueller Messungen der Sickerwassermengen ausgearbeitet.
- **2. Injektionskampagne (März 2010):** Auch das Konzept für die zweite Kampagne wurde basierend auf punktuellen Messdaten entworfen, welche nun jedoch über einen längeren Zeitraum vorlagen. Dabei wurde insbesondere auf der in Strömungsrichtung rechten Seite der Bedarf an weiteren Injektionen ersichtlich.
- **3. Injektionskampagne (September bis Oktober 2013):** Durch die ersten beiden Kampagnen konnte eine signifikante Reduzierung der gesamten Sickerwassermenge erreicht werden. Die Restmenge trat Großteils (ca. 70 %) lokal konzentriert auf der in Strömungsrichtung linken Seite des Sperrwerks aus. Vor diesem Hintergrund wurde Ende 2013 eine dritte, in diesem Fall prophylaktische Injektionskampagne durchgeführt. Für die Konzipierung der dritten Kampagne lag eine umfassende Datenbasis vor, welche mithilfe des Kontrollsystems generiert wurde.

Die Bewertung der Injektionskampagnen ergab, dass mithilfe der o.g. Maßnahmen eine anhaltende Begrenzung der Sickerwassermengen im Regelbetrieb auf unter 10 l min^{-1} erreicht werden konnte. Trotz dieses Erfolgs sind Prognosen zur Entwicklung der Sickerwassermengen aufgrund der Komplexität des Karstgesteins nur bedingt möglich. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass unmittelbar nach den einzelnen Kampagnen eine signifikante Reduktion der Sickerwassermengen beobachtet wurde. Wenngleich mit zunehmender Betriebsdauer die Mengen geringfügig zunahmten bis zu einem im Regelbetrieb weitgehend konstanten Wert, so konnte mit jeder Kampagne der bis dato erreichte Systemzustand weiter verbessert werden.

Den seit der Inbetriebnahme ermittelten Datenbeständen zufolge sind kurz- bzw. mittelfristig keine weiteren Injektionsmaßnahmen erforderlich (Stand August 2015). In diesem Zusammenhang wurde das zunehmende Risiko der injektionsbedingten Verkarstung im Gebirge durch weitere Maßnahmen berücksichtigt, da die angewandten Injektionsdrücke sowie Veränderungen des Fließregimes zu verstärkter Erosion führen können. (Kudella et al., 2015)

Über die Notwendigkeit von künftigen Nachinjektionen kann auf Basis der mithilfe des Kontrollsystems generierten Datenbestände entschieden werden. Dieses System ermöglicht ein kontinuierliches *Monitoring* der Sickerwassermengen, um etwaige Veränderungen ermitteln und geeignete Maßnahmen ableiten zu können. Geeignete Handlungsempfehlungen sowie die zugrunde liegenden Datenauswertungen wurden dem Anlagenbetreiber PU zur Verfügung gestellt. Diese Angaben sind Teil des Inhalts des umfassenden Dokuments „Handbuch zu Konstruktion, Betrieb und Wartung der Wasserkraftanlage *Bribin*“, welches maßgeblich im Rahmen der vorliegenden Dissertation erarbeitet und iterativ mit den beteiligten Teilprojekten des IWRM-Verbundes sowie den indonesischen Partnern abgestimmt wurde.

Ein weiterer Aspekt, welcher im Zusammenhang mit dem *Monitoring* und der Analyse der Sickerwassermengen durch ein weiteres Teilprojekt des IWRM-Verbundes untersucht wurde, war die chemische Zusammensetzung der Sickerwässer (Ruppert, 2013; Kudella et al, 2015). Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Wässer zum Großteil aus Flusswasser und zu einem geringeren Anteil aus Niederschlägen bestehen, welche gemäß der authigenen Filtration (Sickerung, siehe Kapitel 2.6.5.3) langsam in den Untergrund vordringen. Diese Mengen werden in Feinklüften zurückgehalten und erreichen daher das Gebirge im Bereich des Sperrwerks erst mit erheblicher

zeitlicher Verzögerung. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde offenbar, dass die Sickerwässer in Bezug auf Calcit zeitweise erheblich untersättigt sind, was eine Verstärkung der Verkarstungsprozesse im Gebirge zur Folge hat. Wenngleich dies die Annahme zunehmender Sickerwassermengen im laufenden Anlagenbetrieb nahelegt, so konnte jedoch auf Basis von Sensitivitätsanalysen gezeigt werden, dass die pro Jahr gelöste Menge in Bezug auf die Masse und das Volumen des das Sperrwerk umgebenden Gebirges mit hoher Wahrscheinlichkeit unkritisch ist (Kudella et al, 2015).

4.9 Festlegung von Betriebsstrategien (M6)

Auf Basis der Erweiterung des Hochwasserentlastungssystems sowie der Implementierung des Injektions- und Drainagesystems konnte eine Anpassung der Betriebsstrategie der Anlage *Bribin* vorgenommen werden. Dies stellt die sechste Anpassungsmaßnahme (**M6**) dar. So soll das erweiterte Entlastungssystem künftig dazu beitragen, trotz während der Regenzeit Stauhöhen vermeiden zu können, welche die projektierte Fallhöhe von 15 m deutlich überschreiten. Übergeordnete Ziele sind hierbei die Aufrechterhaltung des kontinuierlichen Anlagenbetriebs sowie eine dauerhafte Begrenzung oder gar Reduktion der Sickerwassermengen. Bei Überschreitung des o.g. Stauniveaus ist ein zeitlich verzögerter, sprunghafter Anstieg der Sickerwassermengen zu verzeichnen (siehe Abbildung 4.26).

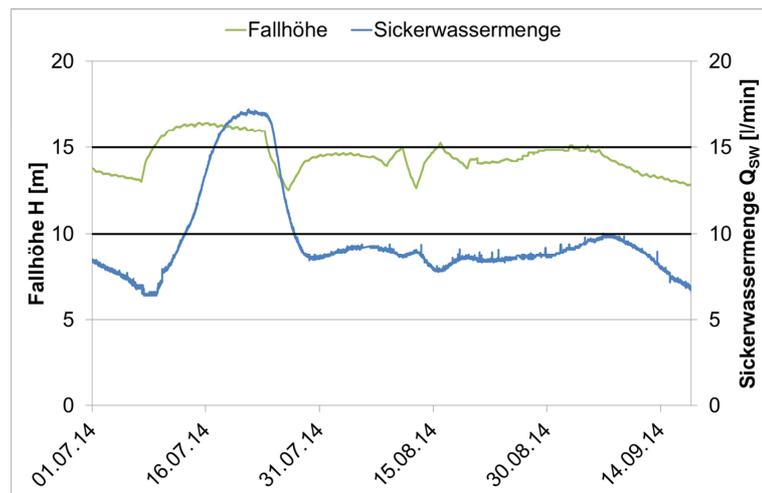


Abbildung 4.26: Korrelation von Sickerwasser und Stauhöhe³⁰ für den Zeitraum Juli bis September 2014

Dieser Anstieg wurde anhand der aufgezeichneten Daten als reversibler Prozess definiert. Um Auswaschungen und verstärkte Lösungsprozesse im Gestein und letztlich hydraulische Durchbrüche vermeiden zu können, ist die Vermeidung von Stauhöhen über 15 m sinnvoll. Die Reversibilität zeigt sich nach Senkung des Stauspiegels in den zulässigen Betriebsbereich bzw. unter 15 m, was eine ebenfalls zeitlich verzögerte Reduktion der Sickerwassermengen zur Folge hat. Bislang (Stand August 2015) haben die Sickerwassermengen stets wieder den Ausgangswert erreicht, welcher vor der Erhöhung gemessen wurde. Laut Untersuchungen von Kudella et al. (2015) erfolgt der Rückgang der Sickerwassermengen durch Umlagerung von Feinsedimenten, wodurch ein „Selbsteheilungsprozess“ des Karstgefüges einsetzt.

³⁰ Die der Darstellung zugrunde liegenden Daten aus dem dritten Quartal 2014 konnten aufgrund einer unvollständigen Aufzeichnung weiterer Betriebsparameter nicht auch für alle weiteren Analysen der vorliegenden Dissertation verwendet werden.

Tabelle 4.6: Betriebsvorgaben für die Anlage *Bribin* in Abhängigkeit von der Fallhöhe

Bereich	Maßnahmen und Verantwortlichkeiten
< 10 m	Kein Betrieb möglich Aufgrund unzureichender Antriebsenergie ist im Falle der Unterschreitung von 10 m das Betriebspersonal verantwortlich für die Abschaltung der Anlage.
> 10 m	Betrieb ist mit Einschränkung erlaubt. Oberhalb von 10 m kann der Anlagenbetrieb durch das Betriebspersonal aufgenommen werden.
Stauziel ±0,5 m	Betrieb ist erlaubt Es handelt sich um den zulässigen Betriebsbereich, welcher durch Starten und Stoppen einzelner Module sowie durch Öffnen und Schließen des Ringkolbenventils (RKV) seitens des Betriebspersonals eingehalten werden soll.
> Stauziel ±0,5 m	Betrieb ist mit Einschränkung erlaubt. Bei Überschreitung muss das RKV weiter geöffnet werden, um zurück zum zulässigen Betriebsbereich zu gelangen. Steigt bei vollständiger Öffnung der Stauspiegel weiter, wird das RKV geschlossen und die Absperrklappe (ASK) geöffnet. Alle Schritte werden durch das Betriebspersonal ausgeführt.
> Stauziel ±1,2 m	Betrieb ist mit Einschränkung erlaubt. Bei Überschreitung dieses Bereichs reicht die Kapazität des RKV nicht aus, die Senkung des Stauspiegels muss demnach zunächst über die ASK erfolgen. Reicht deren Durchflusskapazität nicht aus, wird das RKV erneut geöffnet. Alle Schritte erfolgen durch das Betriebspersonal.
> 15 m	Betrieb ist mit Einschränkung erlaubt. ASK und RKV bleiben vollständig geöffnet bis der zulässige Betriebsbereich wieder erreicht wurde. Alle Schritte sowie eine Meldung an die verantwortlichen Vorgesetzten erfolgen durch das Betriebspersonal.
> 17 m	Betrieb ist untersagt. ASK und RKV bleiben vollständig geöffnet bis der zulässige Betriebsbereich wieder erreicht wurde. Oberhalb 17 m müssen die Maschinen gestoppt werden, um drehzahlinduzierte Schäden zu vermeiden. Alle Schritte erfolgen durch das Betriebspersonal in Abstimmung mit den Verantwortlichen.
> 20 m	Betrieb ist untersagt. ASK und RKV bleiben vollständig geöffnet bis der zulässige Betriebsbereich wieder erreicht wurde. Zusätzlich wird der Bypass geöffnet, um einen weiteren Anstieg des Stauspiegels zu verhindern. Die Maschinen bleiben außer Betrieb. Alle Schritte erfolgen durch das Betriebspersonal in Abstimmung mit den Verantwortlichen.
> 25 m	Betrieb ist untersagt. ASK und RKV bleiben vollständig geöffnet bis der zulässige Betriebsbereich wieder erreicht wurde. Die Maschinen bleiben außer Betrieb. Alle Schritte erfolgen durch das Betriebspersonal in Abstimmung mit den Verantwortlichen.
> 30 m	Betrieb ist untersagt. ASK und RKV bleiben vollständig geöffnet bis der zulässige Betriebsbereich wieder erreicht wurde. Die Maschinen bleiben außer Betrieb. Das Betreten der Maschinenplattform darf aus Sicherheitsgründen nur noch nach Zustimmung der verantwortlichen Vorgesetzten erfolgen. Alle Schritte erfolgen durch das Betriebspersonal in Abstimmung mit den Verantwortlichen.

Weiterhin zielten auch die Anpassung des Regelungssystems (siehe Kapitel 4.3.3) sowie die Schulungen des Betriebspersonals (siehe Kapitel 4.4.1) darauf ab, den Regelbetrieb zu begünstigen sowie die Betriebssicherheit dauerhaft gewährleisten zu können. Demzufolge wurden die in Tabelle 4.6 dargelegten Betriebsvorgaben in Absprache mit dem lokalen Betreiber

definiert und dem Betriebspersonal im Rahmen von Schulungsmaßnahmen vermittelt. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die Abschaltung der Module bei einer Stauhöhe von 17 m zu einem weiteren Anstieg des Stauspiegels führt, da der Gesamtdurchsatz durch das Sperrwerk somit um ca. $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ reduziert wird. Vor diesem Hintergrund wurde die Aktivierung des Bypasses auf eine Stauhöhe von 20 m festgelegt, um einen weiteren Anstieg des Staupegels vermeiden zu können.

4.10 Analyse des Fördersystems

Seit der Inbetriebnahme der Anlage *Bribin* wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation mit umfassender Unterstützung der KSB AG sowie des indonesischen Betreibers und Betriebspersonals fortlaufende Untersuchungen des Fördersystems durchgeführt, um die Notwendigkeit für Anpassungen evaluieren sowie entsprechende Maßnahmen planen und umsetzen zu können. Hierbei wurden auch Schadensfälle eingehend analysiert und durch Plausibilisierung möglicher Ursachen Maßnahmen zur Vermeidung ähnlicher Fälle abgeleitet. In diesem Zusammenhang erfolgte u.a. eine Zustandsanalyse durch Bewertung der Maschinendynamik, da das betriebliche Schwingungsverhalten maßgeblich für die Lebensdauer von Maschinen und Bauteilen sowie für die Kosten für Wartung und Instandhaltung bzw. -setzung verantwortlich ist (Weidemann, 2003).

4.10.1 Bewertung der Maschinendynamik

Im Hinblick auf die in der Anlage *Bribin* eingesetzten Maschinen mit rotierenden Bauteilen gilt es anzumerken, dass „in allen rotierenden Mechanismen [...] Torsions- und Biegeschwingungen durch eine Reihe von Anregungsmechanismen entstehen“ können, woraus eine Überlast der betroffenen Bauteile wie z.B. der Lager resultieren kann (Weidemann, 2003). Gängige Ursachen für eine Unwucht eines rotierenden Mechanismus sind Fertigungsfehler einzelner Bauteile, Fremdkörpereintrag, Verschleißerscheinungen, Anstreifen aufgrund von thermischer Ausdehnung sowie die Anregung durch Ausrichtungsfehler (Weidemann, 2003). Generell äußern sich derlei Einflüsse durch eine erhöhte Schwingungsintensität an repräsentativen Stellen (z.B. am Lagergehäuse) der Maschinen.

Gemäß der Norm ISO 10816-1 (1997) wurde daher im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine Schwingungsanalyse (Hersteller des Messgeräts *Nantong Ketech Instrument CO., LTD*, Typ *Digital Vibration Meter VM-6360*, Messgenauigkeit $\pm 5 \%$) durchgeführt mit dem Ziel der „Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messung an nicht-rotierenden Bauteilen“ (ISO 10816-1, 1997). So wurden Messungen bei drei Modulen jeweils bei drei verschiedenen Stauhöhen durchgeführt, wobei auf die Vermeidung kavitativer Zustände sowie von Lufteinschlüssen in den zu- und abführenden Rohrleitungen geachtet wurde, da hierdurch die Ergebnisse verfälscht werden könnten. „Gestützt auf Erfahrung, ist es bei der Bewertung der [...] Schwingungen umlaufender Maschinen üblich, den Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit zu betrachten, da dieser ein Maß für den Energie-Inhalt der Schwingung ist“ (ISO 10816-1, 1997). Dieser kann gemäß Gleichung (4.1) auf Basis der gemessenen Schwinggeschwindigkeit berechnet werden (ISO 10816-1, 1997).

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (4.1)$$

Die Messungen erfolgten an den Lagersitzen der Maschinen in axialer und radialer Richtung, denn „Messungen sollten an den Lagern, den Lagergehäusen oder anderen Bauteilen ausgeführt werden, welche die Einwirkung von Wechselkräften signifikant widerspiegeln und den gesamten Schwingungszustand der Maschine beschreiben“ (siehe Abbildung 4.27) (ISO 10816-1, 1997).

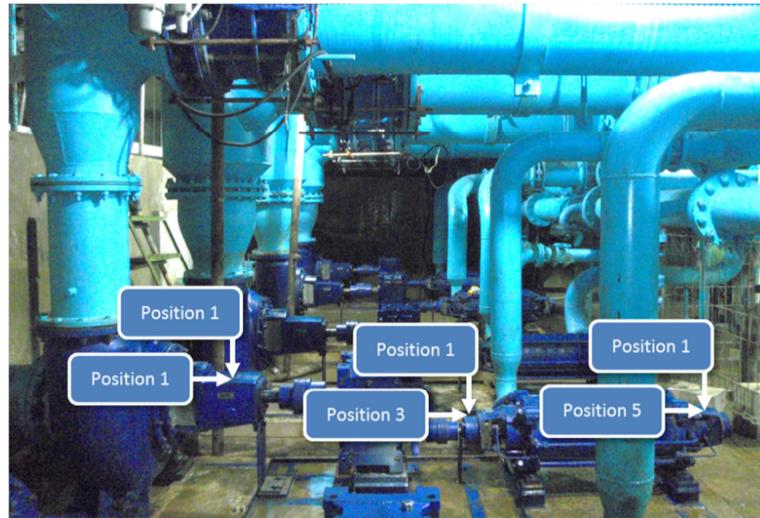


Abbildung 4.27: Darstellung der Messstellen zur Bewertung der Maschinendynamik

Zur Bewertung der ermittelten Effektivgeschwindigkeiten war zunächst eine Einteilung der eingesetzten Maschinen in sogenannte Maschinenklassen erforderlich. Hierbei wird in Klasse I (Bauteile von Maschinen, die starr mit der kompletten Maschine verbunden sind und weniger als 15 kW Leistung erbringen), Klasse II (mittelgroße Maschinen mit 15 bis 75 kW ohne spezielle Fundamente), Klasse III (große Antriebsmaschinen auf starren Fundamenten) und Klasse IV (große Antriebsmaschinen auf nachgiebigen Fundamenten) unterschieden (ISO 10816-1, 1997).

Die Einteilung der in *Bribin* implementierten Module erfolgte in Klasse III. Die zulässigen Grenzwerte für die effektiven Schwinggeschwindigkeiten werden der Maschinenklasse entsprechend festgelegt und in vier verschiedene Bewertungszonen unterteilt, die wie folgt definiert sind: Zone A (neu in Betrieb gesetzte Maschinen), Zone B (ohne Einschränkung dauerhaft betriebsbereit), Zone C (nicht geeignet für dauerhaften Betrieb bzw. nur zeitweiser Dauerbetrieb zulässig) und Zone D (im Betrieb sind weitere Schäden zu erwarten) (ISO 10816-1, 1997). Demzufolge ist eine Eingruppierung der Maschinen in den Zonen A und B erstrebenswert, um einen nachhaltigen und dauerhaften Betrieb gewährleisten zu können.

Tabelle 4.7 zeigt eine Übersicht der im Rahmen der Messkampagne ermittelten Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeit an den Lagersitzen der Maschinen der Module 1, 3 und 4. Es wird ersichtlich, dass insbesondere die saugseitige Lagerung der Förderpumpen für den Dauerbetrieb unzulässig hohe Schwingungswerte aufweisen. Auch die Werte der PAT-Lagerung von Modul 3 überschreiten die zulässigen Grenzwerte teils um ein Vielfaches, wonach die unmittelbare Außerbetriebnahme und Instandsetzung der Maschine erforderlich war. Weiterhin wird ersichtlich, dass die in radialer Richtung gemessenen Werte bis auf wenige Ausnahmen auf der Saugseite der Förderpumpen auf einem höheren Niveau liegen als in axialer Richtung.

Den gezeigten Ergebnissen zufolge liegt die Vermutung nahe, dass die Lagerungen der untersuchten Maschinen zum Messzeitpunkt bereits beschädigt waren. Aufgrund der bis zu diesem Zeitpunkt erreichten Betriebsstunden war dieser Zustand jedoch nicht zu erwarten.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Wenngleich ein exakter Wert für die Betriebsdauer der einzelnen Module nicht angegeben werden kann, da das Kontrollsystem keinen Betriebsstundenzähler beinhaltet, so kann jedoch aufgrund des Messzeitpunkts Mitte März 2013 (Inbetriebnahme der Anlage im Juli 2011) davon ausgegangen werden, dass keines der Module die vom Hersteller KSB AG vorgegebene Stundenzahl für den erforderlichen Austausch des Lagerfetts und die Überprüfung der Lager (15.000 Stunden oder zwei Jahre Betrieb) erreicht hat.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse war daher eine Bewertung möglicher Ursachen für diesen schadhaften Zustand zwingend erforderlich, um für Abhilfe sorgen und derlei Zustände künftig vermeiden zu können. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Schadensanalysen werden nachfolgend vorgestellt. Grundsätzlich konnte durch die Bewertung der Maschinendynamik gezeigt werden, dass durch regelmäßige Schwingungsuntersuchungen im Dauerbetrieb ein entscheidender Beitrag zum frühzeitigen Erkennen von Lagerschäden sowie zur Vermeidung von Folgeschäden an Maschinen und Komponenten geleistet werden kann.

Tabelle 4.7: Ergebnisse der Schwingungsanalyse an den Pumpen und PAT der Förderanlage *Bribin*

Modul-Nr. [-]	H_T [m]	PAT		Förderpumpe Saugseite		Förderpumpe Druckseite	
		Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
		Axial [mm s ⁻¹]	Radial [mm s ⁻¹]	Axial [mm s ⁻¹]	Radial [mm s ⁻¹]	Axial [mm s ⁻¹]	Radial [mm s ⁻¹]
1	11,0	0,600	1,590	19,245	17,429	3,374	7,860
	12,5	1,664	2,563	14,862	12,248	1,879	7,226
	14,0	2,090	2,976	8,920	21,395	2,102	7,152
3	10,6	11,530	52,223	9,279	11,236	2,204	7,034
	12,3	11,035	50,401	15,601	7,917	3,225	8,953
	14,0	17,092	89,202	15,948	9,744	3,722	8,887
4	10,8	3,047	5,514	15,086	20,849	4,018	5,550
	12,4	2,788	7,236	14,780	14,939	4,262	5,725
	14,0	3,166	6,749	14,503	12,397	4,175	5,537
Legende	Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit		Bewertungszone (Maschinenklasse III)				
	A		$v_{eff} < 2,8 \text{ mm s}^{-1}$				
	B		$2,8 \text{ mm s}^{-1} < v_{eff} < 7,1 \text{ mm s}^{-1}$				
	C		$7,1 \text{ mm s}^{-1} < v_{eff} < 11,2 \text{ mm s}^{-1}$				
D		$11,2 \text{ mm s}^{-1} < v_{eff}$					

4.10.2 Schadensanalysen

Die exemplarische Analyse der Maschinendynamik zeigt, dass der technischen Unversehrtheit der Fördermodule durch regelmäßige Wartungs- und ggf. Instandsetzungsarbeiten eine zentrale Rolle zukommt. Bereits in der Konstruktions- und Entwicklungsphase wurde daher im Sinne einer angepassten Technologie darauf geachtet, dass die zu erwartenden Wartungsaufgaben mit den lokalen technischen und ökonomischen Bedingungen vereinbar sind.

Das Ergebnis ist ein wartungsarmes technisches System, das sich durch eine geringe Anzahl an leicht zu beschaffenden und genormten Verschleißteilen (z.B. Rillenkugellager, Dichtungen, Nockenringe für Kupplungen, usw.) und Betriebsmitteln (Getriebeöl, Lagerfett) auszeichnet. Bei sachgemäßer Verwendung aller Maschinen und Komponenten sind somit durchaus Wartungsintervalle von 12 bis 24 Monaten realisierbar. Dennoch kam es in den ersten beiden Jahren, in denen die Anlage *Bribin* kontinuierlich betrieben wurde, wiederholt zu Schadensfällen an einzelnen Modulen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde daher eine umfassende Analyse zur Identifizierung der maßgeblichen Schadensbilder und potentiellen Schädigungsmechanismen sowie zur Beurteilung der Plausibilität der untersuchten Schadenshergänge durchgeführt.

PAT-Lagerschäden und defekte Wellendichtungen an PAT-Gehäusen

Der erste von vier zentralen Schadensfällen trat im betrachteten Zeitraum bei vier Modulen auf und betraf den erhöhten Verschleiß der PAT-Lager (in einem Fall kam es gar zum Bruch des Innenrings und zwei Wälzkörpern, siehe Abbildung 4.28). Tabelle 4.8 zeigt die in Abstimmung mit der KSB AG ausgearbeiteten Schadenshergänge einschließlich einer Bewertung der Plausibilität. Eine Vielzahl der aufgeführten Schadensmechanismen konnte im Rahmen der Untersuchung ausgeschlossen werden. Letztlich wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Restverunreinigung der Lager als ursächlich erachtet (trotz umfassender Reinigung), da die Anlage in mindestens drei bekannten Fällen überflutet wurde und die Maschinen somit unzulässig hohem Fremdkörpereintrag ausgesetzt waren. Eine unmittelbare Abhilfemaßnahme ist der Austausch aller Lager, entweder im Schadensfall oder im Rahmen anderweitiger Wartungsarbeiten.

Sollte im Rahmen eines Multiplikationsvorhabens eine Anlage unter ähnlichen Bedingungen (potentielles Überflutungsrisiko) implementiert werden, kann ein Lagerschaden aufgrund von Fremdkörpereintrag durch die Verwendung von lebensdauer geschmierten gekapselten Lagern oder durch den Einsatz von Tauchpumpen vermieden werden.



Abbildung 4.28: Bruch von Lagerring (links) und Wälzkörper (rechts)

Der zweite Schadensfall betrifft die Wellendichtung zum PAT-Spiralgehäuse. Aufgrund der geringen mechanischen Belastung dieses Bauteils muss bei einem Ausfall eine Veränderung der betrieblichen Eigenschaften vorausgehen. Aufgrund dieses Zusammenhangs konnten mehrere Schadensmechanismen ausgeschlossen und ein vorausgehender Lagerschaden als wahrscheinlichster Hergang definiert werden (siehe Tabelle 4.9), da ein Versagen der Wellendichtungen nur bei Maschinen auftrat, deren Lager zuvor Schaden genommen hatten.

Tabelle 4.8: Analyse von PAT-Lagerschäden in *Bribin*

Schadensfall: Lagerschaden an der PAT	
Mögliche Ursache(n)	Plausibilität
Unterschiedliche statische und/oder dynamische Belastung aufgrund verschiedener PAT-Druckrohrdurchmesser führt zu Überlast an der PAT und/oder zu ungleichförmiger Kraftübertragung zum Getriebe.	Gering: Lagerschäden traten an den Modulen 1 (DN450), 2 (DN450), 3 (DN700) und 5 (DN700) auf, eine Abhängigkeit vom Druckrohrdurchmesser ist somit nicht zu erkennen.
Überlast durch (kurzfristiges) Blockieren des Laufrades aufgrund von Schwemmgut in der PAT.	Gering: Kurzzeitige Überlast führt tendenziell zum Bruch von Komponenten, nicht aber zu erhöhtem Verschleiß. Somit unwahrscheinlich, da bislang nur an einem Modul ein Lagerbruch auftrat.
Überlast durch Übertragung der Schwingungsbelastung des Saugrohrs, induziert durch Turbulenzen im Unterwasser.	Gering: Unwahrscheinlich aufgrund der Schwingungsentkopplung von PAT und Saugrohr mittels Kompensator.
Verschleiß aufgrund der Überschreitung der zulässigen Betriebsstundenzahl.	Gering: Zulässige Betriebsstundenzahl der PAT-Lager liegt bei mind. 15.000 Stunden und wurde im betrachteten Zeitraum bei keinem der Module überschritten.
Thermische Überlast durch unzulässig hohe Betriebstemperaturen.	Gering: Tägliche Temperaturmessung an Lagersitzen zeigt stabiles Temperaturverhalten aller Maschinen im zulässigen Bereich von < 90°C.
Überlast durch unzulässig hohe Betriebsdrehzahlen.	Gering: Die maximal zulässige Drehzahl der PAT von 1.750 min ⁻¹ wird im zulässigen Betriebsbereich bis 17 m nicht erreicht. Weiterhin kann ein Durchgehen einer Turbine aufgrund des Einsatzes durchschlagender Kupplungen zuverlässig ausgeschlossen werden.
Überlast durch das Auftreten von Resonanzschwingungen.	Gering: Im Untersuchungszeitraum wurden keine Resonanzen beobachtet. Weiterhin sind aufgrund der Verschiedenheit der PAT-Druckrohre unterschiedliche Resonanzfrequenzen zu erwarten.
Überlast auf PAT-Druckstutzen durch mangelhafte Abstützung/Aufhängung der PAT-Druckrohre führt zu Fehlansrichtung der Module.	Mittel: Aufgrund der mangelhaften Aufhängung bzw. Abstützung der PAT-Druckrohre durch den indonesischen Betreiber kann dieser Mechanismus nicht ausgeschlossen werden. Da jedoch der Verschleiß an den Kupplungen zw. PAT und Getriebe an den betroffenen Modulen unterschiedlich stark ist, können andere Hergänge als plausibler angesehen werden.
Unzulässig hoher Axial Schub der PAT-Welle aufgrund von fehlenden Entlastungsbohrungen.	Mittel: Aufgrund des Verzichts auf Entlastungsbohrungen zugunsten eines höheren Wirkungsgrades kann dieser Mechanismus nicht ausgeschlossen werden.
Verschleiß als Folge des Eintrags von Verunreinigungen durch Überflutung der Anlagenplattform.	Hoch: Rillenkugellager zeigen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen. Nachdem die Anlagenplattform mindestens dreimal aus verschiedenen Gründen überflutet wurde, wurden die Lager aller Maschinen gereinigt, jedoch nicht ausgetauscht. Eine Restverschmutzung kann daher nicht ausgeschlossen werden und würde auch den Lagerbruch (Lagerinnenring und zwei Wälzkörper) an einem der Module erklären.

Als unmittelbare Maßnahme können die Dichtungen im Falle eines Austauschs der Lager überprüft und ggf. ersetzt werden. Ein Ersatz der Dichtung durch ein belastbareres bzw. widerstandsfähigeres Bauteil ist lt. Hersteller nicht möglich. Jedoch kann im Hinblick auf künftige Multiplikationsvorhaben eine Optimierung der Einsatzbedingungen der Wellendichtung durch die Optimierung der PAT-Lager (lebensdauer geschmiert, gekapselt) herbeigeführt werden.

Tabelle 4.9: Analyse PAT-Dichtungsversagen in *Bribin*

Schadensfall: Defekte Wellendichtung PAT-Gehäuse	
Mögliche Ursache(n)	Plausibilität
Unterschiedliche statische und/oder dynamische Belastung aufgrund verschiedener PAT-Druckrohrdurchmesser führt zu Überlast an der PAT und/oder zu ungleichförmiger Kraftübertragung zum Getriebe.	
Überlast durch (kurzfristiges) Blockieren des Laufrades aufgrund von Schwemmgut in der PAT.	Gering: Überlasten werden zunächst durch das Lager aufgenommen, d.h. ohne zeitgleichen Lagerschaden eher unwahrscheinlich.
Überlast auf PAT-Druckstutzen durch mangelhafte Abstützung/Aufhängung der PAT-Druckrohre führt zu Fehlausrichtung der Module.	
Überlast durch Übertragung der Schwingungsbelastung des Saugrohrs, induziert durch Turbulenzen im Unterwasser.	
Folgeschaden bei Lagerschädigung durch Unwucht der Welle.	Hoch: Dichtungsversagen tritt bislang nur in Verbindung mit einem Lagerschaden auf und kann durch eine Überlast aufgrund der entstehenden Unwucht erklärt werden.

Erhöhter Verschleiß der Nockenringe zwischen PAT und Getriebe

Der dritte Schadensfall betrifft den ungewöhnlich hohen Reibverschleiß der Kupplungen (Hersteller Siemens AG, Typ BIPEX BWN 182) zwischen PAT und Getriebe, da bei sachgemäßer Ausrichtung der Maschinen bzw. Wellen der Verschleiß des eingesetzten Nockenrings nahezu ausgeschlossen werden kann. Bemerkenswert ist weiterhin, dass im gleichen Betrachtungszeitraum bei den Kupplungen zwischen Getriebe und Förderpumpe (Hersteller Siemens AG, Typ BIPEX BWN 127) nahezu kein Verschleiß der Nockenringe beobachtet wurde. Tabelle 4.10 zeigt die Ergebnisse der Schadensanalyse.

Eine potentielle Einflussgröße für den Abrieb der Polymerkomponenten ist die Unwucht der PAT-Welle als Folge eines Lagerschadens. Da jedoch nicht an allen Modulen, die zuvor einen Lagerschaden an der PAT aufwiesen, auch ein erhöhter Verschleiß des Kupplungseinsatzes zwischen PAT und Getriebe beobachtet werden konnte, kann dieser Zusammenhang nicht alleine schadensrelevant sein. Eine weitere aufgrund einer unzureichenden Abstützung bzw. Aufhängung der PAT-Druckrohre durchaus wahrscheinlichere Einflussgröße stellt die mechanische Last auf den PAT-Druckstutzen dar. Durch diesen Kraft- und/oder Drehmomenteintrag in Kombination mit betriebsbedingten Schwingungen kann es zu einer Fehlausrichtung der Maschinen sowie einer Erhöhung der Belastung einzelner Bauteile kommen. Hierbei scheint der Rohrleitungsdurchmesser eine weitere Einflussgröße darzustellen, da bei den Modulen 1 und 2 (beide DN450) zwar Lagerschäden an den PAT auftraten, im Gegensatz zu den

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Modulen 3 und 5 (beide DN700) jedoch kein erhöhter Kupplungsverschleiß festgestellt wurde. Durch die o.g. Instandsetzung und Optimierung der PAT-Lagerung lässt sich der Einfluss einer Wellenunwucht reduzieren bzw. ausschließen. Die mechanische Belastung durch das PAT-Druckrohr kann durch eine ausreichende Abstützung bzw. Aufhängung der Rohrleitung sowie durch die Installation eines Kompensators am Druckstutzen der PAT ausgeschlossen werden.

Tabelle 4.10: Analyse Nockenringverschleiß zwischen PAT und Getriebe in *Bribin*

Schadensfall: Nockenringverschleiß zwischen PAT und Getriebe	
Mögliche Ursache(n)	Plausibilität
Überlast durch (kurzfristiges) Blockieren des Laufrades aufgrund von Schwemmgut in der PAT.	Gering: Es wurde i.d.R. Abrieb vom Nockenring unterhalb der betroffenen Kupplung gefunden. (Kurzzeitige) Überlast würde zwar zu deutlich höherer Walkarbeit im Nockenring führen, jedoch nicht zu dessen umgehendem Verschleiß.
Überlast durch Übertragung der Schwingungsbelastung des Saugrohrs, induziert durch Turbulenzen im Unterwasser.	Gering: Unwahrscheinlich aufgrund der Schwingungsentkopplung von PAT und Saugrohr mittels Kompensator.
Folgeschaden bei Lagerschädigung durch Unwucht der Welle.	Mittel: Verschleiß des Nockenrings trat bislang vorwiegend bei den Modulen 4 und 5 auf, Lagerschäden jedoch bei den Modulen 1, 2, 3 und 5.
Unterschiedliche statische und/oder dynamische Belastung aufgrund verschiedener PAT-Druckrohrdurchmesser führt zu Überlast an der PAT und/oder zu ungleichförmiger Kraftübertragung zum Getriebe.	Mittel/hoch: Eine Fehlausrichtung von PAT und Getriebe sowie eine unzulässig hohe Belastung auf die Kupplung zwischen den beiden Maschinen aufgrund unzulässig hoher Lasten auf dem Druckstutzen der PAT kann nicht ausgeschlossen werden.
Überlast auf PAT-Druckstutzen durch mangelhafte Abstützung/Aufhängung der PAT-Druckrohre führt zu Fehlausrichtung der Module.	

Defekte Wellendichtungen an Pumpengehäusen

Der vierte Schadensfall betrifft multiples Dichtungsversagen auf der Pumpendruckseite. Trotz mehrfacher Überflutung der Anlagenplattform kann hier ein vorausgehender Lagerschaden ausgeschlossen werden, da weder eine Unwucht der Welle noch ein erhöhter Reibverschleiß der Kupplung zwischen Getriebe und Pumpe beobachtet wurde. Auch die erhöhte montagebedingte Vorspannung aufgrund nicht fluchtender Flanschanschlüsse (sowohl am Saug- als auch am Druckstutzen der Pumpe) kann als Ursache ausgeschlossen werden, da sie einen Versatz von Pumpe und Getriebe und somit ebenfalls einen erhöhten Reibverschleiß der Kupplung zur Folge hätte. Die höchste Wahrscheinlichkeit wird daher einem „Festfressen“ der mediengeschmierten Gleitringdichtung bei längerer Standzeit der Maschine zugeschrieben. Dabei setzen sich die engen Spalte zwischen Wellen- und Nabenteil der Gleitringdichtung während des Stillstandes mit Schwebstoffen des Karstflusswassers zu und führen zur Ausbildung von Adhäsionskräften. Wird bei einem Anfahrversuch das erhöhte Losbrechmoment der Gleitringdichtung durch Aufbringen eines äußeren Drehmoments überwunden oder die Pumpe trocken, also ohne Schmierung der Gleitringdichtung betrieben, so kann es zur Abrasion der Gleitflächen und somit zum Versagen der Dichtung kommen. Eine Schädigung der Gleitflächen kann weiterhin durch im Wasser enthaltene Mineralstoffe auftreten (z.B. Quarze), da insbesondere in der Regenzeit große Mengen verschiedener Trübstoffe mit unbekanntem Schädigungspotential mitgeführt werden.

Tabelle 4.11: Analyse Dichtungsversagen an der Förderpumpe in *Bribin*

Schadensfall: Nockenringverschleiß zwischen PAT und Getriebe	
Mögliche Ursache(n)	Plausibilität
Montagebedingte Vorspannung führt zu Fehlausrichtung zwischen Pumpe und Getriebe.	Gering: Unwahrscheinlich aufgrund des ausbleibenden Verschleißes des Nockenrings der Kupplung zwischen Getriebe und Förderpumpe.
Festfressen der Gleitringdichtungen bei langer Standzeit durch Austrocknen des Werkstoffs.	Hoch: Bekanntes Phänomen bei diesem Pumpen- bzw. Dichtungstyp. Die betroffenen Module wiesen im Vorfeld eine hohe Standzeit auf, da weitere Reparaturmaßnahmen anstanden.

Durch regelmäßiges Bewegen der Wellen während der Standzeit der Maschine kann dem „Festfressen“ entgegengewirkt werden. Bestehen Zweifel bzgl. der zuverlässigen Umsetzung dieser Präventionsmaßnahme durch das Betriebspersonal, so können Gleitringe aus keramischen Werkstoffen wie z.B. Siliziumkarbid eingesetzt werden, um die mechanische Belastbarkeit sowie die Lebensdauer im Vergleich zu den in *Bribin* verwendeten Graphitbauteilen zu erhöhen. Im Falle von Multiplikationsprojekten sollte die Werkstoffauswahl der Gleitringdichtungen in jedem Falle unter Berücksichtigung der betrieblichen und personellen Randbedingungen getroffen werden.

4.10.3 Anpassung des Fördersystems und Optimierung von Betriebsmitteln (M7)

Aus den zuvor beschriebenen Schadensanalysen wurden verschiedene Maßnahmen abgeleitet und exemplarisch umgesetzt, um das Fördersystem besser auf die neuen Erkenntnisse abzustimmen. Die nachfolgend dargelegten Schritte werden als siebte Maßnahme zur Anpassung des Anlagenkonzeptes (**M7**) zusammengefasst. Dies umfasst weiterhin die Optimierung von Betriebsmitteln, welche im Anschluss beschrieben wird.

Einsatz alternativer Kupplungstypen

Die Installation des gesamten Rohrleitungssystems sowie dessen Aufhängung wurde durch die indonesischen Betreiber umgesetzt. Die Ausführung der Montage war jedoch teils mit Mängeln behaftet und führte zu unzulässig hohen Stutzenlasten an den PAT. Gründe waren bspw. eine unzureichende Kraftabtragung an den Druckrohrleitungen sowie spannungsbehaftete Anschlüsse der Rohre an die Maschinen aufgrund einer Überschreitung der Montagetoleranzen. Demzufolge ergab sich aufgrund dieser unzulässig hohen Beanspruchung im Betrieb ein geringfügiger Versatz der Maschinen und somit eine zusätzliche Betriebsbelastung in Form einer erhöhten Krafterwirkung auf die eingesetzten Kupplungen. Verstärkt wurde die Belastung auf die eingesetzten Nockenringe durch den Materialabtrag an den Gussnocken der Kupplungsnaßen, bedingt durch die hochkorrosive Umgebung. Die Folge war ein erhöhter Verschleiß aufgrund von Abrasion an den Nockenringen verbunden mit einer reduzierten Lebensdauer dieser Komponente. Daher wurde testweise ein alternativer Kupplungstyp eingesetzt (Hersteller Siemens AG, Typ N-EUPEX A 225), welcher sich durch eine weniger aufwändige Wartung bei gleichbleibender Versatztoleranz auszeichnet. Verschleißfreie Bauarten konnten durch die unveränderlichen Positionen der einzelnen Maschinen nicht verwendet werden, da deren Einsatz bspw. einen größeren Wellenabstand voraussetzt.



Abbildung 4.29: Verschleißerscheinungen an Polymernocken (links) und Gussnaben (rechts) der Kupplungen zwischen PAT und Getriebe

Lastreduzierung an den PAT-Druckstutzen

Da der Versatz der Maschinen weiterhin auf eine überhöhte Belastung der PAT-Druckstutzen zurückzuführen war (aufgrund der o.g. unzureichenden Lastabtragung an den Druckrohren), war das Aufhängungssystem der Druckrohre Gegenstand einer statischen Begutachtung, welche in Kooperation mit dem lokalen Betreiber und der KSB AG durchgeführt wurde. Gemeinsam wurde die testweise Umsetzung von drei Abhilfemaßnahme beschlossen (Abbildung 4.30 zeigt Beispiele dieser Anpassungsmaßnahmen): (1) An den Axialkompensatoren in den PAT-Druckleitungen wurden Zugstangen zur Aufnahme der resultierenden Reaktionskräfte angebracht; (2) an den PAT-Zuleitungen wurden Aufhängungen zur Höhlendecke sowie Abstützungen zur Plattform hin installiert, um die auftretenden Kräfte ableiten zu können. (3) An den Modulen 3, 4 und 5 wurden zur Reduzierung der statischen und dynamischen Belastung testweise Axialkompensatoren unmittelbar vor dem PAT-Druckstutzen installiert.



Abbildung 4.30: Einsatz von Axialkompensatoren zur Lastreduzierung am PAT-Druckstutzen bei den Modulen 3, 4 und 5 (links), Installation von Aufhängungen für die PAT-Druckrohre (rechts)

Auswahl geeigneter Betriebsmittel

Zur Optimierung von Betriebsmitteln wurden Tests mit verschiedenen Getriebeölen durchgeführt. Hierbei wurden im Hinblick auf die spätere Beschaffungssituation Schmiermittel des größten indonesischen petrochemischen Konzerns *PT. Pertamina* sowie des international agierenden Konzerns *Shell plc* verwendet.

Unter Berücksichtigung der Vorgaben des Getriebeherstellers (kinematische Viskosität 150 bis 220 mm² s⁻¹) wurde ein mineralisches (*Pertamina Masri* RG 220) sowie ein synthetisches (*Shell Omala* 220 HD) Öl getestet. Ziel des Versuchs war es, bei der auf dem Prüffeld der KSB AG optimierten Füllmenge von 4,5 Litern (Vorgabe lt. Getriebehersteller 9,8 Liter) das technisch und wirtschaftlich beste Schmiermittel bestimmen zu können. Bei den Prüfstandtests wurde das in Indonesien nicht zu beschaffende synthetische Schmiermittel *Syntholube* G100EP des Herstellers *Molydual* verwendet. Durch die verringerte Ölmenge konnte eine Reduzierung der Planschverluste bei geringer Erhöhung der Betriebstemperaturen erreicht werden, welche im Sinne einer Wirkungsgradoptimierung in Kauf genommen wurden.

Der erste Test in der Anlage *Bribin* wurde mit Mineralöl durchgeführt. Mineralische Schmiermittel zeichnen sich i.A. durch geringe Anschaffungskosten, jedoch durch vergleichsweise kurze Lebensdauern aus. Im betrachteten Fall empfiehlt der Getriebehersteller einen Ölwechsel nach 1.000 Betriebsstunden. Die im Rahmen der Tests gemessenen Höchsttemperaturen von ca. 92°C lagen erwartungsgemäß geringfügig über der zulässigen Temperatur von 90°C und waren somit für den Dauerbetrieb akzeptabel.

Beim Einsatz des synthetischen Öls kam es zu einem deutlichen Temperaturanstieg auf über 110°C, wodurch lt. Getriebehersteller eine thermische Überlast des Getriebes folgen kann. Da die Ursache für diesen Anstieg trotz weiterführender Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem Getriebehersteller nicht abschließend geklärt werden konnte, wurde die Verwendung synthetischer Schmiermittel trotz längerer Lebensdauer – im hier diskutierten Fall 9.000 Betriebsstunden – aus technischer Sicht als nicht sinnvoll erachtet.

4.11 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Vorgehen

Die dargelegten technischen und betrieblichen Analysen des Anlagenbetriebs wurden im Rahmen der Dissertation durch eine Bewertung aus wirtschaftlicher Sicht ergänzt. Um das Ergebnis dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einordnen zu können, wurden für den Standort der Anlage *Bribin* die jährlichen O&M-Kosten (englisch: *Operation and Maintenance*) sowohl für die reale Förderanlage als auch für konventionelle Systeme mit einer Energieversorgung mittels Netzstrom bzw. Dieselgenerator berechnet (siehe Tabelle 4.12). Im Sinne der Vergleichbarkeit wurden jeweils die in Kapitel 4.6.3 ermittelten, durchschnittlichen Jahresförderraten zugrunde gelegt. Die mittleren jährlichen Kosten für Betrieb und Wartung für das reale System wurden auf Basis der gewonnenen Betriebserfahrungen, der Angaben des indonesischen Betreibers für die ersten drei Betriebsjahre sowie entsprechend den Herstellerangaben zu erforderlichen Wartungsaktivitäten für Maschinen und Komponenten abgeschätzt. Einflüsse durch Inflation, die getätigten Investitionen und die Aufnahme von Finanzierungskrediten sowie durch Abschreibungen wurden bei dieser Betrachtung aus folgenden Gründen vernachlässigt.

- Die Inflation ist in Indonesien einer hohen Variabilität unterworfen, wonach alleine im Zeitraum 2002 bis 2013 Werte zwischen 4,3 % und 13,3 % verzeichnet wurden³¹. Eine zuverlässige Prognose wurde daher im Rahmen der vorliegenden Dissertation als nicht darstellbar erachtet.

³¹ www.inflation.eu (05.11.2015)

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

- Die Förderanlage *Bribin* wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens umgesetzt, wodurch die seitens des BMBF sowie den Industriepartnern zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel anteilig für F&E-bezogene Maßnahmen und Aktivitäten eingesetzt wurden. Auf Seiten der deutschen Projektpartner waren die mit dem Bau der Anlage verbundenen Investitionskosten bereits aus dem Vorgängerprojekt des IWRM-Vorhabens bekannt; die Aufwendungen auf indonesischer Seite wurden im Rahmen einer Datenerhebung im Jahr 2013 ermittelt. Da jedoch Zinsen für Finanzierungskredite in starker Abhängigkeit von der wirtschaftlichen Lage eines Landes stehen und Ereignisse wie bspw. die Asienkrise Ende der Neunzigerjahre (siehe Kapitel 2.6.4.3) enormen Einfluss auf die Zinsentwicklung haben, konnte diese für einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten nicht nachweislich abgeschätzt werden. Demzufolge wurden die Investitionskosten bei der weiteren Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.
- Aufgrund dessen war auch die Betrachtung möglicher Abschreibungsmodalitäten für die Anlage *Bribin* obsolet. Diese hätten ohnehin nicht abschließend geklärt werden können, da zum Abschluss der Dissertation noch nicht festgelegt wurde in welcher Gesellschaftsform die Anlage künftig betrieben werden soll (siehe Kapitel 4.12).

Da die genannten Größen jedoch die Ergebnisse einer Wirtschaftlichkeitsberechnung bspw. durch die Kapitalwertmethode oder die Methode des internen Zinsfußes erheblich beeinflussen wurde auf die Anwendung dieser Berechnungsmodelle verzichtet. Die nachfolgend dargelegten Ergebnisse stellen daher lediglich eine näherungsweise Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar. Diese erfolgte letztlich auf Basis der in Kapitel 4.6.3 genannten theoretischen mittleren Förderrate der Anlage (52,5 l/s) sowie der realisierbaren mittleren Jahresförderrate (42 l/s, entspricht ca. 80 % des o.g. Förderpotentials).

Ergebnisse

Bei konventionellen Förderanlagen (netzstrom- oder dieselgeneratorbetriebene Pumpsysteme) sind aufgrund der weltweiten Produktion der Maschinen (dies gilt für Generatoren und Elektromotoren) in großen Stückzahlen vergleichsweise geringe Investitionskosten zu erwarten. Exemplarische Berechnungen für dieselgeneratorbetriebene Fördersysteme führen jedoch zu der Einschätzung, dass ein aus wirtschaftlicher Sicht nachhaltiger Betrieb aufgrund der enormen Treibstoffkosten nicht möglich ist (Berechnung auf Basis des Dieselkraftstoffpreises von August 2015, siehe Tabelle 4.12). So ergaben sich jährliche O&M-Kosten, welche bei einer mittleren Jahresförderrate von 42 l s^{-1} um ca. 255.000 € höher liegen als bei der Anlage *Bribin*. Diese Fördervariante wird aufgrund dieser jährlich aufzuwendenden Mehrkosten trotz deutlich geringerer Investitionskosten nicht weiter berücksichtigt.

Den Berechnungen zufolge sind stromnetzbetriebene Fördersysteme bei einer mittleren Jahresförderrate von 42 l s^{-1} unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich konkurrenzfähig zum „*Bribin*-System“. Dies setzt ein existierendes Stromnetz voraus, was am Standort *Bribin* (wie auch in vielen weiteren Regionen Indonesiens) nicht gegeben ist. Muss die Elektrifizierung erst noch geleistet werden, können erhebliche Erschließungskosten anfallen. Zur Vereinfachung der hier vorgestellten Betrachtungen wurde jedoch ein Stromnetzanschluss als gegeben angenommen. Daher gilt es zu berücksichtigen, dass sich für den realen Standort *Bribin* im Falle einer elektrisch betriebenen Anlage deutlich unterschiedliche Ergebnisse ergeben würden.

Tabelle 4.12: Förderkosten (durch gerundete Werte dargestellt) der Anlage *Bribin*³² und konventioneller Förderanlagen mit alternativer Energieversorgung in Anhängigkeit von der mittleren Jahresförderrate

		Energiequelle für die Wasserförderung		
		<i>Bribin</i>	Netzstrom*	Diesel**
Szenario 1				
Mittlere Jahresfördermenge	l s^{-1}		52,5	
Jahresförderleistung	$\text{m}^3 \text{a}^{-1}$		1.655.640	
Energiekosten	€ a^{-1}	-	167.000	350.000
Gesamte O&M-Kosten	€ a^{-1}	45.000	187.000	370.000
Szenario 2				
Mittlere Jahresfördermenge	l s^{-1}		42	
Jahresförderleistung	$\text{m}^3 \text{a}^{-1}$		1.324.512	
Energiekosten	€ a^{-1}	-	134.000	280.000
Gesamte O&M-Kosten	€ a^{-1}	45.000	154.000	300.000

* Der Berechnung liegt ein Strompreis von 0,099 EUR kWh⁻¹ zugrunde (Stromtarif Kategorie I-3, Stand August 2015)

** Der Berechnung wurde ein Dieselpreis von 1,04 EUR kWh⁻¹ zugrunde gelegt (Dieselpreis August 2015)

Weiterhin basiert diese Aussage auf dem heute gültige Strompreis (Stand August 2015) von 1.200 IDR kWh⁻¹ (entspricht beim o.g. genannten Wechselkurs 0,099 EUR kWh⁻¹). Geht dieser Wert als Konstante in die Berechnungen ein, so ergeben sich bei der realisierbaren mittleren Jahresförderleistung von 42 l s⁻¹ für Betrieb und Wartung Mehrkosten in Höhe von 109.000 € im Vergleich zur Anlage *Bribin*; beim theoretischen Förderpotential von 52,5 l s⁻¹ liegt diese Differenz bereits bei 142.000 € (in beiden Fällen bezogen auf das Bemessungsstauziel von 15 m). Hierdurch wird deutlich, dass der Strompreis erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Förderanlage nimmt. In diesem Zusammenhang hat die Entscheidung der indonesischen Regierung, in den kommenden Jahren eine sukzessive Reduzierung der Subventionen im Bereich der Stromversorgung umzusetzen (siehe Abbildung 4.31), eine sehr hohe Relevanz. Hiernach ergeben sich künftig erheblich höhere O&M-Kosten für elektrische Förderanlagen. So sollen laut dem indonesischen Ministerium für Energie und Mineralressourcen (ESDM) ab 2019 lediglich Subventionen für die Haushaltsklassen von 450 VA und 900 VA gewährt werden, d.h. der Strompreis für alle anderen Versorgungsklassen der Bereiche Industrie, öffentliche Einrichtungen usw. wird ab diesem Zeitpunkt rein marktbasiert festgelegt werden (IISD, 2014). Der nachstehenden Grafik zufolge ist hierbei eine Erhöhung von ca. 25 % zu erwarten. Im Vergleich zu elektrisch betriebenen Förderanlagen weisen die O&M-Kosten des „*Bribin-Systems*“ eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber der mittleren Jahresförderleistung auf. So ist eine Erhöhung der mittleren Förderleistung lediglich davon abhängig ob ein ausreichendes Wasserdargebot gegeben ist; die damit einhergehende Änderung der O&M-Kosten kann dabei als vernachlässigbar betrachtet werden. Demzufolge kann durch Optimierung des Betriebs (z.B. umgehende Regelung bei Abflussschwankungen) und der Wartung (bspw. effiziente Durchführung regelmäßiger Wartungsarbeiten zur Minimierung von Standzeiten) die Rentabilität der Förderanlage ohne nennenswerte Mehrkosten erhöht werden.

³² Aufgrund der erheblichen Kursschwankungen zwischen Euro und indonesischen Rupiah (IDR) wurde der Wechselkurs über den Zeitraum 2002 bis 2013 zu 12.068 IDR EUR⁻¹ gemittelt, www.oanda.com.

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

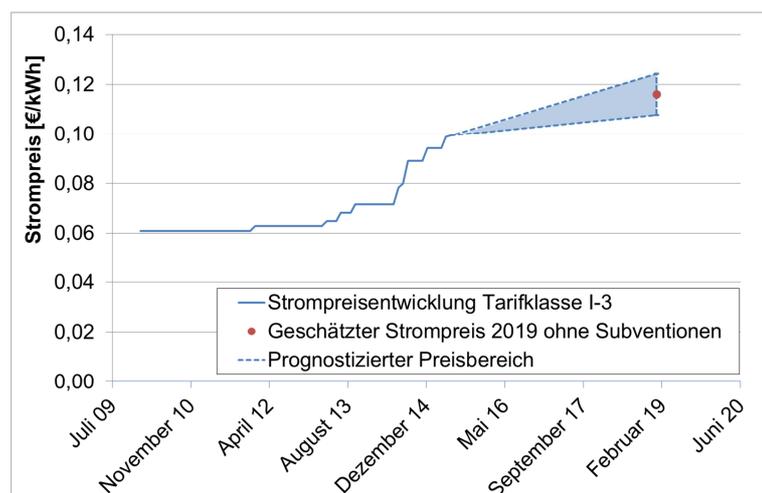


Abbildung 4.31: Strompreisentwicklung³³ für die indonesische Tarifklasse I-3 seit 2009 mit Ausblick bis zum Jahr 2019

Auf einen weiterführenden detaillierten Vergleich der Wirtschaftlichkeit des „*Bribin-Systems*“ mit Förderanlagen, deren Energieversorgung auf anderen Formen erneuerbarer Energien basiert, wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation verzichtet. Der Verzicht begründet sich durch die in Kapitel 3.5.3 dargelegten technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekte, welche aus heutiger Sicht substantielle Nachteile im Hinblick auf die dezentrale Wasserversorgung bergen (Stand August 2015). Künftig können jedoch insbesondere Photovoltaikanlagen eine sinnvolle Alternative zu Wasserkraftantrieben darstellen, sofern wirtschaftlich tragfähige Technologien für *Off-grid*-Anwendungen bereitgestellt werden.

4.12 Institutionelle Einbindung der Anlage Bribin

Im Hinblick auf die nachhaltige Verbesserung der lokalen Wasserversorgung ist neben der Realisierbarkeit geeigneter technischer Einrichtungen auch deren sachgemäßer Betrieb (einschließlich Wartung) von entscheidender Bedeutung. Da die netzgebundene (außer Wassertrucks) Wasserversorgung in der Modellregion *Gunung Kidul* bislang nicht privatisiert wurde (Stand August 2015), fallen bau-, betriebs- und wartungsbezogene Aufgaben öffentlichen Einrichtungen zu. Diese sind gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.4.3 häufig aufgrund stark ausgeprägter Hierarchien durch geringe Effizienz gekennzeichnet. Im Falle des IWRM-Indonesien-Verbundes war auf indonesischer Seite das Ministerium für öffentliche Bauvorhaben (indonesisch: *Kementerian Pekerjaan Umum*, PU) neben der Koordination und der Umsetzung von Implementierungsmaßnahmen auch für den anfänglichen Betrieb der Wasserförderanlage *Bribin* verantwortlich. Die Regionalverwaltungen des PU werden nach Flusseinzugsgebieten unterteilt, wonach im Falle des IWRM-Vorhabens die Zuständigkeit der Abteilung *Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak* (BBWS-SO) zukam.

Planungsgemäß sollte die Verantwortung für Betrieb und Wartung (englisch: *Operation and maintenance*, O&M) an den lokalen Trinkwasserversorger *Perusahaan Daerah Air Minum* (PDAM) übergeben werden, in dessen Zuständigkeitsbereich bereits der Betrieb und die Wartung der regionalen Wasserverteilnetze liegen. Aufgrund des Innovationscharakters der Anlage *Bribin*

³³ http://www.esdm.go.id/regulasi/permen/cat_view/64-regulasi/70-peraturan-menteri/276-peraturan-menteri-esdm/ (16.12.2015)

und dem damit verbundenen anfänglichen Fehlen von (Betriebs-) Erfahrungen ergab sich nach der Inbetriebnahme erwartungsgemäß die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen, um einen technisch und ökonomisch nachhaltigen Anlagenbetrieb gewährleisten zu können. Dies führte letztlich zu Verzögerungen des Übergabeprozesses, da seitens des PU für gewöhnlich Anlagen nach deren Fertigstellung übergeben werden – dieser Begriff ist im Zusammenhang mit der Anlage *Bribin* jedoch schwer greif- bzw. definierbar, wodurch eine gewisse Zurückhaltung der PDAM in Bezug auf die Übernahme von technischer und finanzieller Verantwortung für Betrieb und Wartung der Anlage durchaus nachvollziehbar ist. Hiernach konnte bislang noch keine Vereinbarung über ein verbindliches Übergabedatum sowie die Zuweisung oder Aufteilung von Zuständigkeiten der Betriebs- und Wartungsaufgaben innerhalb bzw. zwischen den beiden Behörden getroffen werden (Stand August 2015). Trotz umfassender fachlicher und organisatorischer Unterstützung von Seiten des KIT steht auch die Festlegung eines technischen Zielzustands als Grundlage für die Übergabe noch aus.

Zusätzlich wurde die Übergabe durch die komplexe Hierarchie der beteiligten Behörden BBWS-SO und PDAM (siehe Abbildung 4.32 und Abbildung 4.33) und der somit erforderlichen Einbindung einer Vielzahl von Personen in Entscheidungsprozesse erschwert. Die fachliche und organisatorische Abstimmung sowohl zwischen deutschen und indonesischen Partnern als auch innerhalb der indonesischen Institutionen wurde hierdurch teils erheblich erschwert, woraus wiederholt zeitliche Verzögerungen resultierten. Diese aufwändigen Abstimmungsvorgänge waren insbesondere vor dem Hintergrund einer zeitlichen Beschränkung verschiedener Implementierungsvorgänge auf die jährliche Trockenzeit von entscheidender Bedeutung. Auch die Beantragung finanzieller Mittel beim Bundesministerium in *Jakarta* war davon betroffen, da Fristen eingehalten werden mussten und eine nachträgliche Beantragung bzw. Umwidmung mit erheblichem Mehraufwand verbunden war.

Ein weiterer Einfluss auf den Übergabeprozess hatte die mangelnde personelle Kontinuität aufgrund der in Kapitel 2.6.3 genannten regelmäßigen Umbesetzung von Zuständigkeiten („*tour of duty*“) innerhalb indonesischer Behörden. In diesem Zusammenhang wurden aufgrund fehlender oder unzureichender Übergabevorschriften Personalwechsellvorgänge auch innerhalb der BBWS-SO erschwert, wodurch bereits vermitteltes Wissen zum Teil verloren ging. Diese administrativen Rahmenbedingungen hatten nicht nur Einfluss auf den Übergabeprozess sondern auch auf den Betrieb und die Instandhaltung sowie auf die Planung und Umsetzung der o.g. Anpassungsmaßnahmen.

Demzufolge kamen bei Planung, Bau und Betrieb der Anlage *Bribin* zunehmend Kommunikationsansätze nach dem „*Bottom-up*-“ (schrittweise Erweiterung einer zunächst sehr detaillierten Betrachtungsweise bis hin zum Gesamtsystem) sowie nach dem „*Top-down*-Prinzip“ (schrittweiser Übergang von allgemeinen, umfassenden Strukturen zu immer spezielleren Details) zur Anwendung. Diesen Prinzipien zufolge wurden je nach Detaillierungsgrad einer bestimmten Aufgabe oder Tätigkeit unterschiedliche Hierarchiestufen bzw. *Managementlevel* angesprochen. Das übergeordnete Ziel war es, das *Knowhow* in Bezug auf einzelne Technologien sowie auf das gesamte Förderkonzept an eine Vielzahl von Wissensträger zu vermitteln, um dessen Verfügbarkeit möglichst dauerhaft, also auch im Falle von Personalwechseln gewährleisten zu können.

Abbildung 4.32 zeigt den für Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Anlage *Bribin* relevanten Auszug der Organisationsstruktur der Behörde BBWS-SO. Es wird ersichtlich, dass neben der komplexen Verwaltungsstruktur auch Aspekte wie eine fehlende Festanstellung des

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Betriebspersonals im Hinblick auf den nachhaltigen Anlagenbetrieb eine entscheidende Rolle spielen. Der in Kapitel 4.4.3 vorgestellten Umfrage zufolge, welche im Rahmen der vorliegenden Dissertation unter dem Betriebspersonal durchgeführt wurde, resultiert aus diesem unsicheren Anstellungsverhältnis in Verbindung mit unzureichender und häufig verspäteter Lohnzahlung eine Unzufriedenheit, welche weitere Erschwernisse oder gar Risiken für den nachhaltigen und sachgemäßen Anlagenbetrieb nach sich ziehen kann. Die Zurückhaltung des PU in Bezug auf eine Festanstellung des Betriebspersonals steht jedoch im Zusammenhang mit der geplanten Übergabe der Anlage, da eine Übernahme des von Seiten des KIT umfassend geschulten und inzwischen sehr erfahrenen Personals durch die PDAM geplant ist (Stand August 2015). Insbesondere auch vor diesem Hintergrund ist eine zeitnahe Festlegung und Abwicklung des Übergabeprozesses von entscheidender Bedeutung.

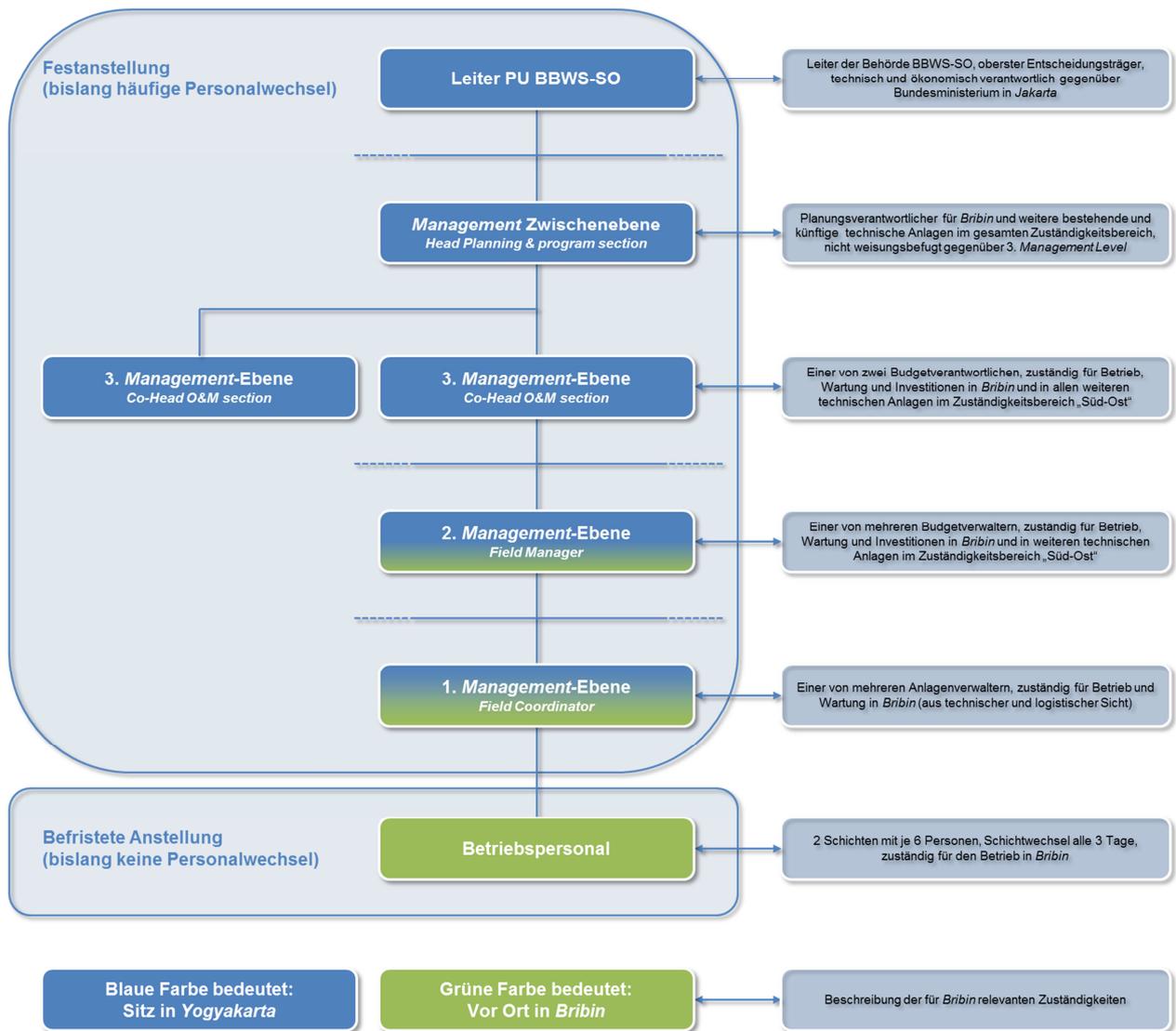


Abbildung 4.32: Reduziertes Organigramm der Behörde BBWS-SO mit den für die Anlage Bribin relevanten Abteilungen (weitere Hierarchiestufen, die für die Anlage nicht bedeutsam sind, sind durch gestrichelte Linien angedeutet)

Viele der mehr als 490 Verwaltungsbezirke Indonesiens verfügen über einen eigenen Wasserversorger (PDAM), welcher dem jeweiligen Bezirksleiter (indonesisch: *Bupati*) unterstellt ist. Auch im Falle *Gunung Kiduls* zeichnet sich diese Versorgungsbehörde durch eine

vielschichtige administrative Struktur aus (siehe Abbildung 4.33). Die technischen und finanziellen Möglichkeiten der PDAM sind im Vergleich zum PU (bzw. zur BBWS-SO) jedoch erheblich eingeschränkt. Instandhaltungs- und -setzungsmaßnahmen oder Anpassungen bestehender Einrichtungen können daher nur in geringem Umfang durch PDAM-eigenes Personal und Budget erfolgen. Des Weiteren sind viele der Wasserversorger noch heute gegenüber der Zentralregierung verschuldet, wonach die Aufnahme von weiteren Krediten rechtlich untersagt ist, bis die Verbindlichkeiten gegenüber der Regierung getilgt wurde.

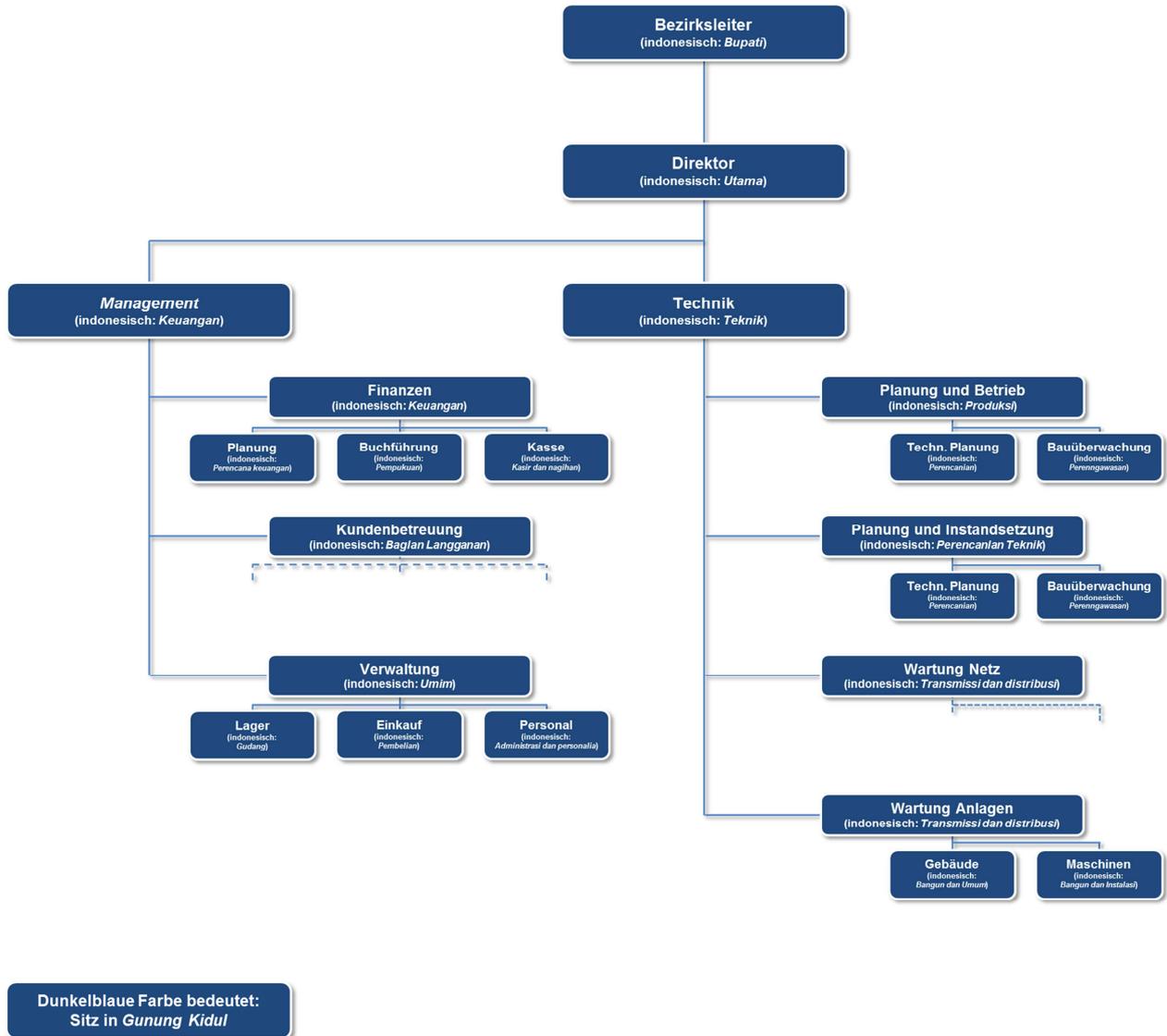


Abbildung 4.33: Reduziertes Organigramm der Behörde PDAM mit den für die Anlage *Bribin* relevanten Abteilungen (weitere Hierarchiestufen, die für die Anlage nicht bedeutsam sind, sind durch gestrichelte Linien angedeutet)

Zur Realisierung und Finanzierung umfangreicherer Maßnahmen bzw. von Neubauten muss demnach von Seiten der PDAM ein Antrag an das PU gestellt werden. Diese Abhängigkeit beeinflusst in hohem Maße die (strategische) Planung der PDAM sowie die Umsetzung baulicher Maßnahmen, woraus nicht selten zeitliche Verzögerungen und Mehrkosten für die Realisierung resultieren. Insbesondere im Falle unerwartet bzw. spontan auftretender Schäden an technischen Einrichtungen wird durch diese Abhängigkeitssituation eine zeitnahe Abhilfe erschwert oder gar verhindert, woraus sich Standzeiten der Anlagen oder gar Folgeschäden an den eingesetzten Maschinen ergeben können. (OECD, 2012)

4 Betriebsanalyse der Wasserförderanlage Bribin

Im Hinblick auf die Wasserförderanlage *Bribin*, welche durch ihren Innovationscharakter und somit erwartungsgemäß durch einen anfänglich begrenzten Erfahrungsschatz charakterisiert ist, stellt eine eingeschränkte planerische, technische und finanzielle Selbstständigkeit des Betreibers ein erhebliches Risiko für den nachhaltigen Betrieb dar. Mittelfristig ist es daher trotz eines umfassenden Erfahrungszugewinns unumgänglich, dass die Anlage in eine geeignete Unternehmensform überführt bzw. in angemessener Weise institutionell eingebunden wird.

Vor diesem Hintergrund ist ein im Rahmen der vorliegenden Dissertation untersuchter Lösungsansatz die Überführung in die 1996 in Indonesien eingeführte *Perseroan Terbatas* (P.T., indonesisch: Gesellschaft mit beschränkter Haftung, GmbH) als inzwischen am häufigsten gewählte Gesellschaftsform. Eine P.T. kann als Mischform zwischen den in Deutschland bekannten Gesellschaftstypen GmbH und Aktiengesellschaft beschrieben werden (gtai, 2015). Vorteile ergäben sich hierbei aufgrund der geringen administrativen Anforderungen (bspw. werden zur Gründung lediglich zwei Gesellschafter und eine Einlage von 20 Millionen indonesische *Rupiah*³⁴ benötigt) sowie aufgrund der gesellschaftsrechtlichen Haftungsbeschränkung (begrenzt finanzielles und rechtliches Risiko entscheidend bei der Nutzung innovativer Technologien) (gtai, 2015). Da die Anlage *Bribin* jedoch im Besitz einer öffentlichen Einrichtung ist, ist die Überführung in eine P.T. rechtlich nicht möglich.

Eine realisierbare Alternative stellt die Ausgliederung der Anlage *Bribin* als sogenannte *Badan Layanan Umum* (BLU, indonesisch: öffentliche Dienstleistungsagentur) dar, woraus sich eine eigenständige Organisation im öffentlichen Dienst mit Funktionen, die ein gewisses Maß an Unabhängigkeit bieten, ergibt (OECD, 2012). Diese Flexibilität ermöglicht bspw. die Reduzierung administrativer Vorgänge sowie die Anstellung von qualifiziertem Fachpersonal, ohne, dass auf die in Behörden üblichen Einkommensgrenzen Rücksicht genommen werden muss (USAID, 2008). Des Weiteren zeichnet sich eine BLU durch finanzielle Selbstversorgung aus, da sie eigenständig über das erwirtschaftete Kapital verfügen kann. In dieser Gesellschaftsform wäre *Bribin* nach wie vor an das PU angegliedert, der Betrieb und die Instandhaltung würden jedoch aus technischer und finanzieller Sicht eigenständig erfolgen. Im Bedarfsfall (bspw. bei umfangreichen und/oder technisch sehr anspruchsvollen Maßnahmen) könnte jedoch nach wie vor eine fachliche bzw. technische Unterstützung beim PU beantragt werden.

Als dritte Alternative ist die Überführung der Anlage *Bribin* in eine *Public Private Partnership* (PPP, siehe Kapitel 2.2 und 2.4.3) zu nennen. Die Anwendung dieses Unternehmensmodells in Indonesien geht auf die Wirtschaftskrise in den Jahren 1997 und 1998 zurück. So wurden Anfang der 2000er-Jahre in Indonesien geeignete politische und rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen (*Presidential Regulations* 67/2005, 13/2010 und 56/2011), um die Wirtschaft infolge der „Asienkrise“ (siehe Kapitel 2.6.4) auch mithilfe privater Akteure wiederzubeleben (OECD, 2012). Der Fokus lag dabei auf der Zusammenarbeit von öffentlichen Einrichtungen und privaten Unternehmen in den Bereichen Infrastruktur, Finanzen und Management (OECD, 2012). Aus rechtlicher Sicht kommen *Government Contracting Agencies* (GCA), Provinzniederlassungen von Bundesministerien, regionale Behörden sowie der nationale Stromversorger *PT. Perusahaan Listrik Negara* (PLN) als öffentliche Partnerinstitutionen einer PPP infrage (OECD, 2012).

Die Gründung einer PPP sollte im Idealfall gemäß den o.g. Gesetzesvorgaben erfolgen, da diese Konformität Voraussetzung für Bürgschaften von Seite der Regierung ist; rechtlich ist dies jedoch nicht bindend. Aus strategischer Sicht ist es sinnvoll, diesen Richtlinien zu entsprechen, da die Kreditvergabe von Banken zunehmend von dieser Art der Rückversicherung beeinflusst wird.

³⁴ Laut www.oanda.com entspricht dies 1.289,15 € (Stand 18.08.2015)

Welche Vorhaben letztlich die Bewilligung als PPP erhalten, hängt neben der Einhaltung rechtlicher Vorgaben auch von der politisch-strategischen Bedeutung ab, d.h. Projekte mit hohem politischen Interesse werden noch heute vorrangig durch konventionelle Verfahren in alleiniger Verantwortung der zuständigen Behörde(n) umgesetzt. Weiterhin wird die Zustimmung zur Gründung einer PPP durch die hohe Anzahl der im Auswahlprozess beteiligten Institutionen beeinflusst, wonach der Prozess mit einem nicht zu unterschätzenden administrativen und zeitlichen Aufwand verbunden sein kann. (OECD, 2012)

Unter anderem für Wasserförderanlagen mit autarker Energieversorgung nach dem Vorbild *Bribins* kann die von Seiten der Regierung geplante Ausweitung der PPP-Maßnahmen im Rahmen des im Jahr 2011 in Kraft getretenen *Master Plan for Acceleration and Expansion of Indonesia's Economic Development* (MP3EI, Laufzeit 2011 bis 2025) von Vorteil sein. Diese Strategie zielt u.a. auf den verstärkten Infrastrukturausbau (einschließlich Energiegewinnung und Wasserversorgung) mithilfe privater Akteure ab, da die erforderlichen Investitionen keinesfalls alleine mittels öffentlicher Gelder geleistet werden können (OECD, 2012).

Unabhängig davon, welche Art der Gesellschaftsform für die Anlage *Bribin* gewählt wird, muss die Initiierung der erforderlichen administrativen Vorgänge von Seiten des PU bzw. durch dessen Regionalverwaltung BBWS-SO erfolgen. Wie seitens des KIT wiederholt angeregt erfordert ein solches Vorhaben neben der inhaltlichen und terminlichen Abstimmung mit dem Wasserversorger PDAM die Bereitstellung personeller und finanzieller Mittel, um die bürokratischen Vorgänge sach- und fristgemäß bearbeiten zu können. Bislang wurden diese Rahmenbedingungen jedoch noch nicht erfüllt (Stand August 2015).

5 Ansatz zur Technologieimplementierung in der Wasserförderung

Eine nachhaltige Verbesserung der Wasserförderung (dies gilt auch für die Wasserversorgung im Allgemeinen) ist untrennbar mit der Anwendung von an die lokalen Bedingungen angepassten Technologien verbunden – dieser deduktive Schluss stellt den Kern der vorliegenden Dissertationsschrift dar. Doch was bedeutet angepasste Technologie? Bezieht sich die Anpassung ausschließlich auf die Auswahl bzw. Adaption von Maschinen und Komponenten, also auf die *Hardware* (Jéquier, 1976)? Oder ist die „Mensch-Maschine-Schnittstelle“, die *Software*, in gleichem Maße für den Erfolg, also für die nachhaltige Funktionserfüllung einer technischen Einrichtung verantwortlich (Jéquier, 1976)?

Die Antwort der Schrift auf die letztgenannte Frage ist ein klares *Ja*, wodurch der Bedeutung eines umfassenden Wissenstransfers für die künftigen Betreiber in allen Stadien der Technologieentwicklung und -implementierung eine entscheidende Bedeutung zukommt. Unter Berücksichtigung dieser Forderung wurde im Rahmen der Dissertation ein Ansatz erarbeitet, um die zuvor beschriebenen „wasserkraftbetriebenen Pumpsysteme“ (WPS) standortgerecht entwickeln und nachhaltig implementieren zu können. Basierend auf den Erfahrungen, die im Rahmen der Umsetzung der Wasserförderanlage *Bribin* gewonnen wurden, konnten drei zentrale Aspekte identifiziert werden, welche als entscheidend für einen erfolgreichen Technologietransfer im Wassersektor erachtet werden. Anschaulich beschrieben werden diese Aspekte durch folgenden Leitsatz: „[...] *Technologie kann immer nur so gut sein wie der Kopf, der sie nutzt*“ (Jekel, 2013).

Als erster Aspekt sei die Notwendigkeit zur Partizipation aller Interessensgruppen (englisch: *Stakeholder*) genannt. Denn laut BMZ (2006) ist als Grundlage für die problemgerechte Entscheidungsfindung im Wassersektor ein umfassender Wissenstransfer für alle *Stakeholder* in Bezug auf vorhandene Wasserressourcen sowie im Hinblick auf deren Nutzbarmachung unabdingbar. Dieses *Capacity Development* schließt im Sinne des Mehrebenenansatzes alle Interessensgruppen sowie alle relevanten Hierarchiestufen innerhalb dieser Gruppen ein, da häufig auf den einzelnen Ebenen ein unterschiedlicher Kenntnisstand sowie eine unterschiedliche Datenverfügbarkeit gegeben ist (Kessler-Thönes, 2008). Um eine nachhaltige Wirkung entfalten zu können ist es von Bedeutung, dass das *Capacity Development* in allen Stadien von der Planung bis hin zum Betrieb erfolgt. Im Fall der Implementierung von Wasserfördertechnologien in Schwellen- und Entwicklungsländern sind Überschneidungen zwischen den einzelnen Interessensgruppen möglich bzw. wahrscheinlich – im Idealfall erfolgen der Bau und der Betrieb der technischen Einrichtung sowie die spätere Nutzung des Wassers durch eine einzige Gruppe, wodurch sich insbesondere der Vorteil der weitgehenden Vermeidung von Interessenskonflikten ergibt (Scholz et al., 2004).

Das Mitwirken aller Anspruchsgruppen ermöglicht weiterhin eine umfassende und kontinuierliche Datenerhebung. Dies ist essentiell, da insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern die defizitäre Wasserversorgung häufig auf mangelndes Wissen bzw. unzureichende

Informationsbestände zurückzuführen ist. Dies betrifft sowohl Daten über die Wasserverfügbarkeit und -qualität als auch über sozio-kulturelle und sozio-ökonomische (Einfluss-) Faktoren (BMZ, 2006). Scholz et al. (2004) zufolge ist daher die nachhaltige Verbesserung der lokalen Wasserversorgung eng mit der Kooperation und Abstimmung mit allen relevanten *Stakeholdern* verbunden.

Zweitens beschreibt das o.g. Zitat die Notwendigkeit der Anpassungsfähigkeit einer Technologie, sodass diese auf die künftigen Nutzer, auf deren Wissen und Können sowie auf deren technische und ökonomische Möglichkeiten abgestimmt werden kann. Forscher verschiedener Fachbereiche haben sich in den vergangenen Jahrzehnten bereits eingehend mit diesem Thema auseinandergesetzt (Schumacher, 1973; Jéquier, 1976; Baumer, 1983). Diesen Quellen zufolge ist zu berücksichtigen, dass bei der Anwendung einer bestimmten Technologie in einer hoch entwickelten Region meist auf eine umfassende Wissensbasis, auf *State-of-the-Art*-Techniken in der Fertigung und Montage sowie auf ausreichende Finanzmittel (Investitions- und O&M-Kosten) zurückgegriffen werden kann. In einem Schwellen- oder Entwicklungsland hingegen sind im Hinblick auf die Anwendung der gleichen bzw. einer vergleichbaren Technologie meist weder das erforderliche Wissen noch geeignete technische und/oder ökonomische Bedingungen gegeben. Die Definition und Auslegung einer Technologie zur Realisierung eines bestimmten Zweckes – im hier diskutierten Fall zur Wasserrförderung – erfordert daher neben einer technischen Machbarkeitsstudie eine Analyse der lokalen sozio-ökonomischen und sozio-kulturellen Rahmenbedingungen sowie eine klare Ausarbeitung der Zielsetzung des Vorhabens (u.a. Scholz et al., 2004; Nestmann et al., 2012).

Drittens kann dem Zitat zufolge die Notwendigkeit der Anpassungsfähigkeit implizit auch auf die Methodik übertragen werden, welche der Technologieentwicklung und -implementierung zugrunde liegt. Die Methodik muss somit die beiden vorausgegangenen Aspekte, Partizipation aller *Stakeholder* und Anpassungsfähigkeit der Technologie, integrieren.

5.1 Analogie zur *Bloom'schen* Lernzieltheorie

Unabhängig vom fachlichen Inhalt ist das Ziel von *Capacity-Development*-Maßnahmen zumeist der Transfer von Wissen, welches zur Umsetzung einer bestimmten Tätigkeit benötigt wird. Der geleistete Wissenstransfer kann auch als Vermittlung von Lern- oder Lehrzielen beschrieben werden, welche eine eingängige und nachvollziehbare Aufbereitung fachlicher Inhalte für den Lernenden ermöglichen (Glameyer, 2015). In welcher Form Lernziele angewandt werden sollen, um einen nachhaltigen Wissenstransfer für die Lernenden zu erreichen, wird im Europäischen Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR, englisch: *European Qualifications Framework*, EQF) beschrieben. Flacke et al. (2011) zufolge sollen mithilfe von Lernzielen Kenntnisse (Wissen), Fertigkeiten (Anwendung von Wissen) und Kompetenzen (Übernahme von Verantwortung durch Anwendung von Kenntnissen und Fertigkeiten) an die Lernenden vermittelt werden. Die Unterscheidung und Vergleichbarkeit von Lehrzielen beruht im Wesentlichen darauf, dass sie sich an unterschiedlichen Verhaltensweisen orientieren können, welche sich anhand formaler Kriterien in drei Gruppen unterteilen lassen (Eisele und Kräft, 2012).

Affektive Lernziele werden durch „*Gefühl, Emotion, Einstellung, Anerkennung oder Wertschätzung*“ charakterisiert und vermitteln „*die Fähigkeit, angemessene (moralische) Werturteile bilden zu können und eigenes Verhalten danach auszurichten*“ (Eisele und Kräft, 2012). Sie unterstützen bei der Problemlösung jedoch nur bedingt eine rationale und strukturierte

Vorgehensweise, weshalb sie nicht als Grundlage für den hier beschriebenen Implementierungsansatz berücksichtigt werden können. Psychomotorische Lernziele hingegen „*beinhalten die Beherrschung von Bewegungsabläufen und komplexen Verhaltensweisen*“ (Eisele und Kräft, 2012). Auch diese Form der Lernziele eignet sich nicht als Grundlage für die Implementierungsmethodik, da sie mit zu hohen Anforderungen an Wissen, Lernleistung und das Verhalten der Zielpersonen verbunden ist. Kognitive Lernziele hingegen haben „*mit intellektuellen Prozessen wie Wissen, Wahrnehmen, Erkennen, Denken Auffassen, Beurteilen und Begründen*“ (Eisele und Kräft, 2012) zu tun und eignen sich demzufolge als Grundlage für die Entwicklung einer rational strukturierten Methodik zur Technologieimplementierung.

In den 1950er Jahren wurden durch *Benjamin S. Bloom* verschiedene Taxonomien (Klassifikationsschemata) für alle drei Verhaltensbereiche entwickelt, welche eine hierarchische Einordnung von Lernzielen „*vom Einfachen zum Schwierigen, vom Überschaubaren zum Komplexen*“ ermöglichen (Eisele und Kräft, 2012). Da innerhalb einer solchen Taxonomie „*unterschiedliche Niveaustufen*“ beschrieben werden, eignen sie sich auch zur Vermittlung von Wissen und Aufgaben, welche „*abgestufte Schwierigkeitsgrade aufweisen*“ (Eisele und Kräft, 2012). Entscheidend ist, dass jede Stufe der Taxonomie die Kenntnisse und Fähigkeiten der darunterliegenden Stufen voraussetzt (Glameyer, 2015). Diese Ordnung nach dem Schwierigkeits- bzw. Komplexitätsgrad ermöglicht eine individuelle Einbindung und Förderung einer beliebigen Zahl von Personen anhand einer einzelnen Methodik (Eisele und Kräft, 2012). Im Falle der kognitiven Lernziele umfasst die *bloom'sche* Theorie sechs Prozessstufen, welche der nachfolgenden Tabelle 5.1 entnommen werden können.

Tabelle 5.1: Beschreibung kognitiver Prozesse nach *Bloom* (Flacke et al., 2011)

Kognitiver Prozess	Beschreibung
I	Erinnern Wiedergeben von Fakten und Informationen
II	Verstehen Erläutern und Umformen von Informationen und Ideen
III	Anwenden Erlerntes Wissen in neuen Situationen anwenden
IV	Analysieren Prüfen und Gliedern von Informationen, Schlussfolgerungen ziehen, Verallgemeinerungen treffen
V	Evaluieren Verbinden von Informationen zu einem neuen Zusammenhang, Formulieren alternativer Lösungen
VI	Kreieren Darstellen und belegen einer Auffassung durch Beurteilung von Informationen sowie der Qualität einer Arbeit auf Grundlage eines Kriterienkatalogs

Der *bloom'schen* Ansatz eignet sich aufgrund seiner einfachen Struktur und Übersichtlichkeit sowie der damit verbundenen geringen Komplexität als Grundlage für die Entwicklung der angestrebten Implementierungsmethodik. Lediglich eine Modifikation in Form eines begleitenden *Capacity Development* zur Gewährleistung der Anwendbarkeit des vermittelten Wissens sowie zur Einordnung der Lehrinhalte in größere Zusammenhänge durch die Lernenden ist hierbei erforderlich. Ermöglicht wird dies weiterhin durch die spezifische Ausarbeitung der Implementierungsmethodik für WPS, da hierdurch der allgemeine Charakter des *bloom'schen* Ansatzes durch konkretere Handlungsanweisungen ersetzt wird (siehe Kapitel 5.3).

Der Umfang der Untersuchungen und Analysen, welche unabdingbarer Bestandteil dieser Handlungsanweisungen sind, orientiert sich an der Lern- und Leistungsbereitschaft der einzelnen Zielpersonen, denn „*individuelles Lernen stellt in diesem Verständnis die Voraussetzung dafür dar, dass Organisationen lernen*“ (Lülfs, 2013). Trotz der unterschiedlichen Vertiefung der

Lerninhalte wird durch das gemeinsame Lernen individuelles in kollektives Wissen „überführt und letztlich der Gesamtorganisation zur Verfügung gestellt“ (Lülfs, 2013). Dieses sogenannte „organisationale Lernen“ ist Gegenstand eines breitgefächerten Forschungsbereichs, wobei weitgehend Einigkeit besteht, dass diese Form des Lernens zumeist mit kognitiven Ansätzen und somit mit einer „Veränderung von Wissen und Wissensstrukturen“ einhergeht (Lülfs, 2013). Die Eignung der *bloom*'schen Lernzieltheorie als Basis für die Ausarbeitung des hier vorgestellten Implementierungsansatzes wird dadurch verdeutlicht.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass bereits in den 90er Jahren „Kultur als Gegenstand organisationalen Lernens sowie die kulturelle Richtung als Ergänzung der kognitiven und der verhaltensorientierten“ identifiziert wurde (Lülfs, 2013). Demzufolge nimmt „das Umfeld extensiven Einfluss auf kognitive Prozesse“ (Lülfs, 2013), wonach ein erfolgreicher Wissenstransfer nicht aus bloßem Vermitteln von Lehrinhalten resultiert, sondern aus der gemeinsamen Erarbeitung der Kenntnisse unter Beteiligung aller Lehrenden und Lernenden (Lülfs, 2013). Aus dieser Form des gemeinschaftlichen Erkenntnisgewinns ergeben sich Analogien zu sogenannten Problemlösungsverfahren.

5.2 Adaption von Problemlösungsprozessen

In vielen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie Industrieprozessen werden heuristische Verfahren und Methoden zur Problemlösung angewandt, deren Grundstruktur häufig auf einer Adaption des *bloom*'schen Ansatzes für kognitive Lernziele beruht. Gemäß dem Zweck solcher Problemlösungstechniken zur Überführung eines Ist- in einen Sollzustand können diese Verfahren grundsätzlich auch zur Technologieimplementierung eingesetzt werden.

Beispielsweise könnten das „SPALTEN-Verfahren“ oder die „Ausgangs-/Zielanalyse“ Anwendung finden wenn es darum geht, selbst für höchst anspruchsvolle Rahmenbedingungen ein realisierbares Wasserförderkonzept auszuarbeiten und nachhaltig zu implementieren (Saak, 2006). Generell wird die Problemlösung als zielgerichtetes und strukturiertes Vorgehen „anhand eines übergeordneten Ablauf-/Handlungsplans“ beschrieben (Saak, 2006). Dieser Plan beinhaltet sequentiell oder parallel zu bearbeitende Schritte zur nachhaltigen Überführung eines Systems von einem „unbefriedigenden in einen befriedigenden Zustand“ (Saak, 2006). Das Erreichen des gewünschten Ziel- bzw. Endzustands erfordert die Überwindung einer „Barriere“, welche beispielsweise durch Informationsdefizite oder fehlende Hilfsmittel gekennzeichnet sein kann (Saak, 2006). Dieser Beschreibung zufolge kann ein methodischer Ansatz zur Entwicklung und Implementierung von Wasserfördersystemen als Problemlösungsstrategie beschrieben werden.

Durch die gezielte Anwendung von derlei Strategien wird „eine Verbesserung der Erfolgswahrscheinlichkeit und Planungssicherheit erzielt“, verbunden mit einer „Aufwands- und Zeitoptimierung“ (Saak, 2006). Dies beinhaltet eine Vermeidung von Iterationsschritten, welche laut Saak (2006) durch „mangelhafte Entwicklung von alternativen Lösungen [...] oder eine Lösungsauswahl ohne ausreichende entscheidungsrelevante Informationen und Bewertungskriterien“ entstehen. Letztlich ermöglicht die methodische Vorgehensweise im Vergleich zu „einer intuitiven und unbewussten Vorgehensweise“ eine „Risikominimierung und Sicherheitsmaximierung“ (Saak, 2006). Vor diesem Hintergrund stehen der Anwendung bekannter Problemlösungsverfahren zur Implementierung innovativer Wasserfördertechnologien in Schwellen- und Entwicklungsländern drei zentrale Aspekte entgegen:

Erstens berücksichtigen Methoden wie das SPALTEN-Verfahren oder die Ausgangs-/Zielanalyse das für den nachhaltigen Betrieb sowie für die Erschließung des Multiplikationspotentials der Technologie essentielle *Capacity Development* i.d.R. nicht oder nur unzureichend. Zweitens sind zur Anpassung und sinngemäßen Anwendung dieser bewusst sehr allgemein gehaltenen Verfahren umfassende, jedoch gerade in Schwellen- und Entwicklungsländern häufig nicht vorhandene Methodenkenntnissen erforderlich. Drittens bedingt der allgemeine Charakter bekannter Problemlösungsverfahren eine hohe Komplexität der Methoden und führt dazu, dass die Anwendung des Verfahrens „mit den herkömmlichen Hilfsmitteln in Dokumentformat“ nur begrenzt möglich ist – d.h. die rechnergestützte Anwendung dieser Methoden wird künftig unumgänglich sein (Saak, 2006).

Im Rahmen der vorliegenden Schrift wird daher eine Systematik zur Technologieimplementierung in der Wasserförderung entwickelt, deren Struktur die umfassende Einbindung der Zielpersonen (sowohl Betriebs- als auch Führungspersonal) in den Entstehungsprozess der technischen Einrichtung sowie die Befähigung dieser Personen zur Bewältigung der anschließenden Betriebs- und Wartungsaufgaben unterstützt. Um dabei den insbesondere bei Implementierungsvorhaben in Schwellen- und Entwicklungsländern häufig sehr anspruchsvollen Rahmenbedingungen Rechnung zu tragen (u.a. limitierte Datengrundlage, begrenzte Ressourcenverfügbarkeit usw.), schließt der Ansatz eine Optimierungsmethode in Anlehnung an das international anerkannte Instrument des „Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses“ (englisch: *Continuous Improvement Process*) ein.

5.3 Struktur des Implementierungsansatzes

Die Implementierungsmethodik wurde unter anderem mit dem Ziel entwickelt, dass sie bei möglichst geringer Komplexität sowohl für die erste Planungsphase als auch für jedwede nachfolgende Anpassungsstufe anwendbar sein soll. Dies führte zu einer übergeordneten Struktur, welche, ausgehend von der zuvor beschriebenen Lernzielanalyse nach *Benjamin S. Bloom*, auf fünf aufeinanderfolgende Schritte sowie das stets begleitende *Capacity Development* begrenzt wurde (siehe Abbildung 5.1).

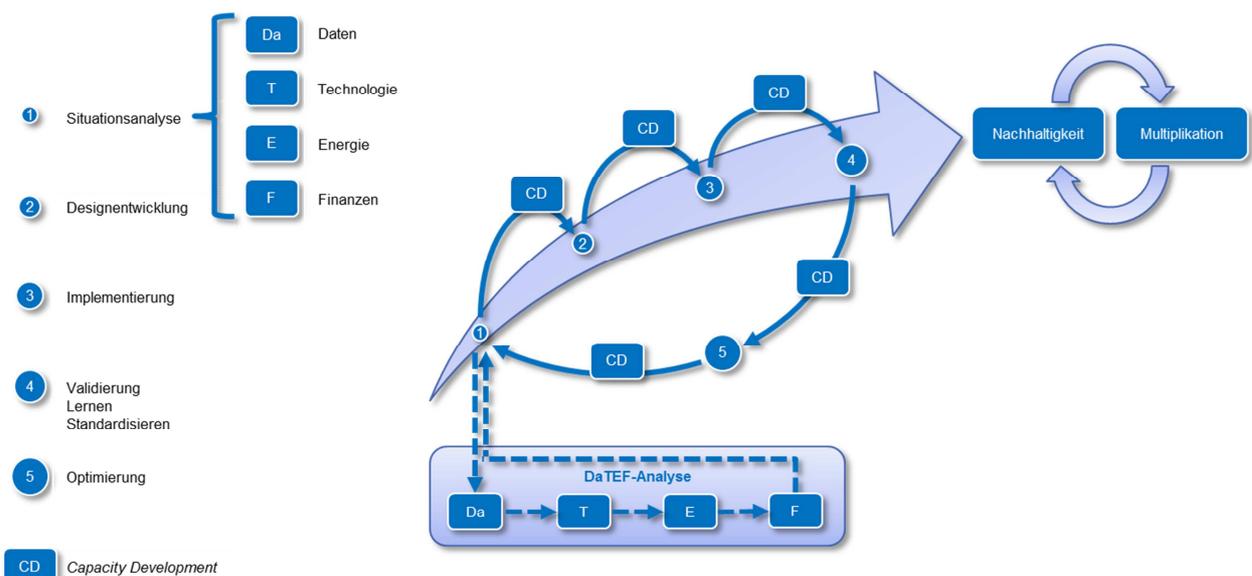


Abbildung 5.1: Struktur des im Rahmen der Dissertation entwickelten Implementierungsansatzes für Wassertechnologien

5.3.1 Schritt 1: Situationsanalyse

Durch die Aufgliederung des ersten Schrittes („Situationsanalyse“) erfolgt die Anpassung des zunächst noch allgemeinen Implementierungsansatzes für die Entwicklung, Implementierung und Anpassung des WPS (eine Anwendung für weitere Teilsysteme ist ebenfalls möglich). Wenngleich die nachfolgende Beschreibung auf die Entwicklung des Fördersystems abzielt, so kann mit entsprechender Adaption von Schritt 1 der Ansatz auch für die Planung, Umsetzung und Anpassung weiterer Teilsysteme der Gesamtanlage (z.B. Hochwasserentlastungssystem, *Monitoring*-System, Betriebsstrategie, Injektionsschirm und Drainagesystem falls erforderlich) angewandt werden ohne, dass die Struktur verändert werden muss.

Hierzu wurde die sogenannte „DaTEF-Analyse“ (Daten, Technologie, Energie und Finanzien; englisch: *Data, Technology, Energy and Finances*) entworfen, deren einzelne Abschnitte zwar grundsätzlich ihrer Priorität nach geordnet sind, eine sukzessive Bearbeitung jedoch nicht bei jedem Vorhaben realisierbar sein wird, da die einzelnen Abschnitte gewollt ineinandergreifen und der erforderliche Aufwand für deren Bearbeitung in hohem Maße anwendungsabhängig ist. Die Bewertung der erarbeiteten Datengrundlage ergibt sich implizit, da die Bearbeitung des jeweils nachfolgenden Abschnitts nur bei ausreichendem Kenntnisstand aus den vorausgehenden Untersuchungen bearbeitet werden kann. Im Anschluss folgt eine ausführliche Beschreibung dieser vier Abschnitte:

Daten: Die Erfassung standortspezifischer Rahmenbedingungen und Einflussgrößen stellt eine entscheidende, gleichwohl eine komplexe Aufgabe im Hinblick auf die Entwicklung und Implementierung von Wasserfördertechnologien dar. Derlei Vorhaben sind insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern häufig durch fehler- und lückenhafte oder gar fehlende Datengrundlagen geprägt.

Ohne Kenntnisse der naturräumlichen (u.a. zeitliche und räumliche Variation des Wasserdargebots, nutzbare Fallhöhe, erforderliche Förderhöhe, siehe Kapitel 3.6) sowie der sozio-ökonomischen und -kulturellen Gegebenheiten (u.a. Wasserbedarfs- und *Stakeholder*-Analyse, Bewertung einer institutionellen Einbindung oder Privatisierung der Fördereinrichtung, Beurteilung des Ausbildungsstandes potentieller Betreiber) können weder die Verfügbarkeit von Ressourcen, der Wasserbedarf noch realisierbare Förderkonzepte ausreichend bewertet werden. Demzufolge stellt die Datenakquise unweigerlich den ersten Abschnitt zur erfolgreichen Technologieentwicklung und -implementierung dar.

Zur Bewertung des Anpassungspotentials nach erfolgter Implementierung des Fördersystems ist weiterhin die sukzessive Erweiterung der Datenbestände während des gesamten Vorhabens von entscheidender Bedeutung (siehe Kapitel 5.3.5). Zusätzlich umfasst der Abschnitt „Daten“ die Klärung der Zuständigkeiten in Bezug auf die Datenakquise und das vorhabenbegleitende Datenmanagement sowie im Hinblick auf Bau, Betrieb und Wartung der technischen Einrichtung.

Technologie: Mit Unterstützung durch die KSB AG wurde die in Kapitel 5.4 beschriebene Methode zur Auslegung „wasserkraftbetriebener Pumpsysteme“ (WPS) entwickelt, welche neben dem Einsatz von „Pumpen als Turbinen“ (PAT) als Antriebsaggregate Kreiselpumpen als Fördermaschinen vorsieht. In einem iterativen Verfahren ermöglicht sie die Abstimmung lokaler naturräumlicher

Anforderungen mit technisch geeigneten und verfügbaren Maschinen. Entscheidend ist, dass im Arbeitsschritt „Technologie“ zunächst eine Vordimensionierung zur Bewertung der Machbarkeit sowie zur Abschätzung des technischen und finanziellen Aufwands erfolgen sollte. Die finale Ausarbeitung des WPS erfolgt in Schritt 2 (siehe Kapitel 5.3.2).

Um Unsicherheiten in Bezug auf die verfügbare Datengrundlage Rechnung zu tragen, kann eine schrittweise Implementierung in Verbindung mit einer Vor-Ort-Validierung und einer sukzessiven Erweiterung der Datenbestände sinnvoll sein. So kann in einer ersten Ausbaustufe eine teilweise Nutzung des anzunehmenden Wasserkraftpotentials bzw. Wasserdargebots erfolgen. Im Betrieb können die Datenbestände zur Bewertung des Ausbaupotentials der Anlage schrittweise erweitert werden. Dies bedingt eine gewisse Flexibilität des Anlagendesigns, um den technischen und wirtschaftlichen Aufwand weiterer Ausbaustufen gering halten zu können. Neben der technischen Dimensionierung erfordert jede dieser Ausbaustufen eine Kosten-Nutzen-Analyse, sodass die Wirtschaftlichkeit zu jeder Zeit gewährleistet wird.

Energie: Der Fokus der gesamten Methodik liegt klar auf WPS, deren Betrieb auf der Nutzung regenerativer Wasserkraft als Antriebsenergie basiert. Das im Abschnitt „Technologie“ vordimensionierten Wasserfördersystem setzt daher auf eine möglichst effiziente Nutzung des zeitlich und räumlich zur Verfügung stehenden Wasserdargebots. Im dritten Abschnitt „Energie“ soll nun die Machbarkeit weiterer Förderkonzepte erörtert werden, welche durch alternative Formen erneuerbarer Energien angetrieben werden (siehe Kapitel 3.5.3). In diesem Zusammenhang sollen auch konventionelle Fördermethoden betrachtet werden (dieselgenerator- oder netzstrombetriebene Pumpsysteme), da diese in den betroffenen Regionen häufig die gängigsten Vertreter im Bereich der Wasserförderung darstellen (siehe Kapitel 3.5.2).

Finanzen: Die ökonomische Bewertung steht bewusst am Ende der DaTEF-Analyse, da hierfür ein realisierbares Konzept sowie möglichst genaue Kenntnisse in Bezug auf die Systemanforderungen erforderlich sind. Hierbei sollen alle in Betracht gezogenen Varianten auf ihre Finanzierbarkeit hin untersucht werden.

Sind die kalkulierten Implementierungs- und/oder die zu erwartenden Betriebs- und Wartungskosten zu hoch bzw. ist aus anderen Gründen ein kostendeckender Betrieb nicht möglich, so müssen der Umfang des entworfenen Förderkonzeptes reduziert und/oder die Mitfinanzierung durch private *Stakeholder*, nationale (z.B. Industriepartner oder private Unterstützer) oder internationale Institutionen (z.B. Weltbank, *Asian Development Bank*, Kreditbank für Wiederaufbau usw.) untersucht werden. In diesem Zusammenhang wird auch auf innovative Finanzierungsmodelle wie z.B. *Crowdfunding* als sinnvolle Alternative und/oder Ergänzung zur Realisierung eines solchen Vorhabens hingewiesen. Beim vornehmlich über das Internet organisierten *Crowdfunding* erfährt ein Vorhaben finanzielle Unterstützung durch eine Vielzahl an Personen (englisch: *Crowd*). Hierbei wird den Förderern nach erfolgreicher Umsetzung i.d.R. eine Gegenleistung gewährt, welche je nach Vorabsprache von einer Danksagung bis hin zu einer finanziellen Erfolgsbeteiligung reichen kann.

Zum Abschluss dieses vierten Abschnittes sollte im Idealfall mindestens ein aus technischer, ökonomischer und im Falle des Antriebs auf Basis regenerativer Energien auch aus ökologischer Sicht nachhaltiges Förderkonzept stehen. Da bis hierhin bereits eine Bewertung aus technischer (Abstimmung auf die naturräumlichen Bedingungen), betrieblicher (bzgl. manuellem oder automatisiertem Betrieb, Verfügbarkeit gut ausgebildeten Personals usw.) und logistischer Sicht (bzgl. initialer Beschaffung von Maschinen und Komponenten, Bereitstellung von Ersatzteilen usw.) erfolgt ist, kann abschließend die realisierbare Fördermenge Q_P als primäres Auswahl- bzw. Bewertungskriterium angesetzt werden. Unterscheidet sich dieser Wert bei den einzelnen Konzepten nur geringfügig, so kann durch die im Abschnitt „Finanzen“ erfolgte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Lösung ausgewählt werden, welche in Abhängigkeit von den Standortbedingungen den höchsten Gewinn (oder die geringsten Verluste, da bspw. im Falle sehr ungünstiger Standortbedingungen auch eine subventionierte Wasserversorgung denkbar ist) ermöglicht.

5.3.2 Schritt 2: Designentwicklung

Schritt 2 konzentriert sich zu Beginn des Vorhabens auf die vollständige Auslegung des Gesamtsystems. Ist die bauliche Umsetzung der Gesamtanlage bereits erfolgt, sieht Schritt 2 eine kontinuierliche Überprüfung des Anpassungspotentials aller Teilsysteme vor. Die nachstehende Beschreibung betrifft das Vorgehen bei der anfänglichen Realisierung der Anlage.

Das Anlagendesign schließt neben der Fördereinheit weitere Teilsysteme wie bspw. eine Hochwasserentlastungseinrichtung sowie ein *Monitoring*-System zur kontinuierlichen betriebsbegleitenden Erfassung der maßgebenden Betriebsparameter ein. Hierbei erscheint es sinnvoll Erfahrungswerte aus Vorgängerprojekten wie die in Kapitel 4 beschriebenen Kenntnisse aus der Pilotanlage *Bribin* einfließen zu lassen. So erfordert bspw. eine nachträgliche Erweiterung der Hochwasserentlastungseinrichtung ein flexibles Gesamtsystem, um den technischen und finanziellen Aufwand etwaiger Maßnahmen begrenzen zu können (siehe Kapitel 4.7); zur allzeitigen Gewährleistung eines sicheren und effektiven Anlagenbetriebs ist bei der Entwicklung des *Monitoring*-Systems die Beteiligung des Betriebspersonals und maßgeblicher Entscheidungsträger erforderlich (siehe Kapitel 4.3).

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, welcher das Anlagendesign maßgeblich beeinflusst, ist das Betriebskonzept, welches die Regelung der Anlage innerhalb definierter Grenzen vorsieht. Im Hinblick auf dezentrale Anwendungen in entlegenen Regionen weist den Erfahrungen aus *Bribin* zufolge eine manuelle Regelung substantielle Vorteile gegenüber einem höheren Automatisierungsgrad auf (siehe Kapitel 4.3.3). Grundsätzlich kann gesagt werden, dass unter Berücksichtigung der Ausbildungs- und Ausrüstungsstandards der künftigen Betreiber sowie der technischen und wirtschaftlichen Bedingungen ein Kompromiss im Hinblick auf den Automatisierungsgrad gefunden werden muss. D.h. es gilt die Technikabhängigkeit gegen die Personalabhängigkeit abzuwägen.

Da sowohl technisches als auch menschliches Versagen i.d.R. nicht zuverlässig oder nur durch enormen technischen und somit auch ökonomischen Aufwand ausgeschlossen werden kann, ist nach Möglichkeit eine Konstruktionsausführung als sogenanntes *Fail-Safe*-System (englisch: Sicheres oder beherrschbares Versagen) sinnvoll (Wissner, 2010). Hierbei wird im Betrieb ein Versagen von Komponenten erlaubt, jedoch nur wenn sichergestellt werden kann, dass sich

hieraus keine schwerwiegenden Folgen ergeben. Dieses Konstruktionsprinzip deckt Bedien- und Materialfehler sowie den Ausfall der Energieversorgung gleichermaßen ab (Wissner, 2010). Das Ziel ist hierbei das Beibehalten bzw. das automatisierte Herbeiführen eines sicheren Betriebszustandes im Schadensfall. Der Nachteil einer erhöhten Technikabhängigkeit wird hierbei durch die Eigenschaften des *Fail-Safe*-Systems kompensiert, wonach sich im Falle eines Bedienfehlers ein sicherer Betriebszustand einstellt.

Wird das Fördermodul bspw. mit sogenannten durchschlagenden Kupplungen ausgestattet, so führt die Schädigung dieser Verbindung zu einer Trennung von Antriebs- und Lastseite und somit bei andauernder Beaufschlagung zur Beschleunigung der PAT auf ihre Durchgangsdrehzahl. Bei längerem Anhalten dieses Betriebszustandes sind erhebliche Maschinenschäden zu erwarten. Durchschlagssichere Kupplungen besitzen hingegen eine Notlauffunktion, die im Schadensfalle die Trennung von Last und Antrieb verhindern und das Schadenspotential deutlich verringern.

Weiterhin ist auch die *„Redundanz wichtiger (Einzel-) Systeme [...] eine Form des Fail-Safe, da der Ausfall bzw. das Versagen einer Systemkomponente durch die Ersatzkomponente kompensiert werden kann“* (Wissner, 2010). Zur Gestaltung einzelner Teilsysteme und Komponenten können auch die in Kapitel 5.3.5 beschriebenen Risikomanagementmethoden (RMM) angewandt werden, da sie eine vollständige (Teil-) Systemanalyse und somit das frühzeitige Erkennen von Schwachstellen ermöglichen. Da diese Methoden eine umfassende Dokumentation einschließen, kann bei Folgeprojekten auf einen breiten Erfahrungsschatz vorausgehender Vorhaben zurückgegriffen werden.

Im Hinblick auf die Festlegung des Automatisierungsgrades sowie des Betriebskonzeptes ist weiterhin bedeutsam, dass den Ausführungen in Kapitel 4.12 zufolge die fehlende Kontinuität in Form von häufigen Personal- und Zuständigkeitswechseln ein gängiges Problem bei Implementierungsvorhaben in Schwellen- und Entwicklungsländern darstellt. Da hierdurch die Weitergabe von Erfahrungswerten und Wissen erheblich erschwert wird, ist die Dokumentation aller geforderten und tatsächlichen Eigenschaften der Teilsysteme sowie des Gesamtsystems entscheidend.

Hierzu eignet sich insbesondere der Einsatz von Stücklisten, da sie *„Fertigungs- und Entwicklungsaufgaben in allen Branchen“* steuern (Geckler, 2006). Diese Maßnahme entspricht dem Sinne des Produktlebenszyklusmanagements (PLM), welches die Berücksichtigung aller innerhalb der Lebensdauer eines Produktes aufkommender Informationen vorsieht. Hierdurch können Kenntnisse gesichert und weitergegeben werden, welche nicht nur die Planung und Umsetzung, den Betrieb und die Instandhaltung sowie etwaige Anpassung- bzw. Optimierungsmaßnahmen innerhalb des aktuellen Vorhabens erheblich vereinfachen können. Auch die künftige Multiplikation wird durch diese Form der Dokumentation begünstigt.

Die Entscheidung, in welchem Detaillierungsgrad die Stücklisten (bspw. Mengen-, Individual- oder terminierte Stückliste) geführt werden sollen, muss dabei von Fall zu Fall unterschieden werden. Hierbei kann auch eine unterschiedliche Vorgehensweise in Bezug auf die einzelnen Teilsysteme gewählt werden. Um im Schadensfall die umgehende Reparatur bzw. einen raschen Austausch zu ermöglichen, ist bspw. eine vollständige und durchgängige Nummerierung samt Spezifikation von Rohrleitungssegmenten, Armaturen usw. sinnvoll. Entsprechende Informationen sind i.d.R. auch von Herstellern von Maschinen (Pumpen, Getriebe, Armaturen usw.) erhältlich, um die Ersatzteilbeschaffung zu vereinfachen.

5.3.3 Schritt 3: Implementierung

Durch die in den vorausgegangenen Schritten geschaffene Datengrundlage sowie auf Basis des daraus resultierenden Anlagendesigns kann nun die Implementierung der Fördereinrichtung erfolgen. Wurde die Anlage bereits baulich umgesetzt, folgt in Schritt 3 die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, welche sich durch ergänzende Erkenntnisse aus dem Dauerbetrieb ergeben haben. In jedem Fall erfordert die Implementierungsphase eine Fortführung der Dokumentation aller Systemeigenschaften und Maßnahmen, was bspw. in Form von Aktualisierungen bzw. Anpassungen der bestehenden Stücklisten umgesetzt werden kann.

Am Beispiel der Anlage *Bribin* kann diese Notwendigkeit eindrücklich beschrieben werden. So führten die limitierte Datengrundlage zu Beginn des Vorhabens sowie die Begrenzung des Zeitraums für die Datenerhebung im Rahmen der Machbarkeitsstudie (siehe Kapitel 2.6) zu einem hochdynamischen Umsetzungsprozess. Um alle neuen Erkenntnisse unmittelbar in Form von Systemanpassungen berücksichtigen zu können, war es demzufolge erforderlich auch während der Bauphase das zu Beginn initiierte *Monitoring* fortzuführen. Bspw. konnte mithilfe kontinuierlicher Abflussmessungen die anzunehmende Mindestabflussmenge näher bestimmt werden, wodurch letztlich die Maschinenauswahl maßgeblich beeinflusst wurde. Nicht zuletzt dieses Beispiel lässt erahnen, dass ohne entsprechendes Datenmanagement die Anpassung des Systems erheblich erschwert wird und das Risiko eines Wissensverlustes zunimmt.

5.3.4 Schritt 4: Validierung, Lernen, Standardisierung

Nach Abschluss der baulichen Maßnahmen sieht die Implementierungsmethodik in Schritt 4 eine umfassende Validierung vor. Zu Beginn des Vorhabens umfasst dies eine eingehende Untersuchungen sowohl des Gesamtsystems als auch der einzelnen Teilsysteme. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf einem Abgleich des jeweiligen Ist- und Soll-Zustand. Wurde die Anlage bereits nach ihrer Fertigstellung vollständig validiert, so bezieht sich Schritt 4 vornehmlich auf die wiederholte Analyse der einzelnen Teilsysteme. Hierbei soll überprüft werden ob sich während des (Dauer-) Betriebs oder nach außergewöhnlichen Ereignissen (z.B. Hochwasser, Maschinenschaden) Veränderungen ergeben haben.

Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen können nach Möglichkeit sogenannte „Routinen“ abgeleitet werden, welche als vordefinierte Systemanalysen einschließlich der Durchführung daraus abgeleiteter Maßnahmen in festgelegten Zeitintervallen beschrieben werden können. Eine rein auf Routinen basierte Vorgehensweise ist jedoch zumeist nicht erstrebenswert, da diese Standardprozeduren Einfluss auf das „*nachhaltigkeitsbezogene Individuallernen*“ bspw. in Form einer Einschränkung der bewussten Reflexion der eigenen Tätigkeiten nehmen können (Lülf, 2013). „*Routinen können so zu falscher Wahrnehmung und zu selektiver Aufmerksamkeit führen*“, wodurch beispielsweise die Gewährleistung der Funktion einer technischen Einrichtung auf Kosten der ökologischen Nachhaltigkeit erfolgen kann (Lülf, 2013). *Awareness raising*, also die Schaffung eines Bewusstseins für die eigenen Aufgaben sowie für deren Tragweite ist daher ein zentraler Bestandteil des begleitenden *Capacity Development*.

Zum Teil kann die Validierung bzw. die Durchführung routinemäßiger Systemuntersuchungen durch das Betriebspersonal erfolgen. Ist eine entsprechende Vorbildung gegeben bzw. wurden die benötigten Kenntnisse vermittelt so kann die Einbindung des Personals gar einen entscheidenden Beitrag zur Identifikation mit der Anlage leisten. Vor dem Hintergrund der erwähnten hohen Personalfuktuation in Schwellen- und Entwicklungsländern ist auch die Beteiligung höherer Hierarchieebenen sinnvoll, sodass der Wissenserhalt sowie eine hohe

Transparenz auf allen Ebenen gewährleistet werden können. Die kontinuierlich gewonnenen und umfassend dokumentierten Erkenntnisse dienen im Weiteren als Basis zur Bewertung von Anpassungsmaßnahmen. Um die Notwendigkeit dieser Maßnahmen bewerten zu können, ist auch hierbei die kontinuierliche Einbindung der Entscheidungsträger von Vorteil, da hierfür umfassende Systemkenntnisse erforderlich sind. Alle anderen (Teil-) Systemanalysen, deren fachliche Anforderungen bei der Umsetzung die Fähigkeiten des Betriebspersonals übersteigen, erfordern zur Gewährleistung der sachgerechten Ausführung den Einsatz von (externen) Fachkräften.

5.3.5 Schritt 5: Optimierung

Bei der Planung von Maßnahmen zur Optimierung bereits realisierter Anlagen werden die ersten vier Schritte analog zur o.g. Beschreibung durchlaufen. Mit dem Unterschied, dass statt der Entwicklung des ganzheitlichen Anlagenkonzeptes Teilsysteme im Hinblick auf deren Potential für (weitere) Anpassungs- bzw. Optimierungsmaßnahmen untersucht werden. Um dabei anspruchsvollen Rahmenbedingungen wie bspw. einer limitierten Datengrundlage Rechnung zu tragen, schließt der hier vorgestellte Ansatz eine Optimierungsmethode in Anlehnung an das international anerkannte Instrument des „Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses“ (KVP, englisch: *Continuous Improvement Process*, CIP) ein (Kostka und Kostka, 2011).

Der in vielen Industriezweigen angewandte KVP stammt aus dem Bereich des Qualitäts- und Ideenmanagements und beruht auf dem japanischen Konzept des *Kaizen* (japanisch: Das Gute verbessern). Er fordert eine stete Überprüfung eines zu beurteilenden Systems sowie nach Möglichkeit bzw. nach Erforderlichkeit eine Verbesserung des zum Betrachtungszeitpunkt aktuellen Systemzustandes. Kostka und Kostka (2011) zufolge ist der Grund der durch *Kaizen* postulierte sukzessive Verfall eines jeden Systems ab dem „Zeitpunkt seiner Errichtung [...], wenn es nicht ständig erneuert bzw. verbessert wird“. Demzufolge sind die Ziele dieses Qualitätsmanagementprinzips „die Eliminierung von Verschwendungen aller Art“, der achtsame „Einsatz von Ressourcen sowie die Berücksichtigung der Nachhaltigkeit aller Tätigkeiten“ (Kostka und Kostka, 2011).

Dieser Methode zufolge können gewonnene (Betriebs-) Erfahrungen dazu angewandt werden, Komponenten oder Funktionen eines Gesamtsystems zu identifizieren, die sich unter gegebenen Bedingungen weniger eignen oder gänzlich ungeeignet sind. Die Umsetzung erfolgt in Form von (Teil-) Optimierungen des betrachteten Systems sowie nach Möglichkeit durch die Standardisierung von Abläufen (siehe Kapitel 5.3.4). Indem die gewonnenen Erfahrungen als sukzessive Erweiterung der Datenbestände herangezogen werden und als Grundlage zur Ausarbeitung der Optimierungs- bzw. Anpassungsmaßnahmen dienen, kann der häufig defizitären Datenlage bei der Technologieimplementierung in Schwellen- und Entwicklungsländern mithilfe einer kontinuierlichen Systemoptimierung begegnet werden.

Definitionsgemäß eignet sich der KVP für die Optimierung bestehender Systeme, nicht aber zur initialen Implementierung. Hier unterscheidet sich die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Implementierungsmethodik vom ursprünglichen KVP, da sie Anwendungspotential sowohl für die erste Planungs- und Bauphase als auch für alle nachfolgenden Optimierungs- bzw. Iterationsstufen im (Dauer-) Betrieb bietet.

Unverzichtbare Hilfsmittel sind dabei ein umfassendes und kontinuierliches *Monitoring* des Gesamtsystems (siehe Kapitel 5.3.1) bzw. aller Teilsysteme sowie die nachgeschaltete Datenanalyse. Ein Kernelement des KVP sowie der hier beschriebenen Methodik sieht weiterhin

die kontinuierliche Einbindung des Betriebspersonals sowie von Entscheidungsträgern vor, da hierdurch Erfahrungen, Kenntnisse und Fähigkeiten aller Beteiligten integriert werden können. Dies bedingt die Strukturierung der zugehörigen Prozesse dahingehend, dass *„jeder Mitarbeiter seine Ziele und Verantwortlichkeiten kennt, den Gesamtprozess versteht und seinen Beitrag zur Gesamtzieelerreichung erkennen kann“* (Kostka und Kostka, 2011). Neben der Befähigung des Personals zur selbstständigen Durchführung von Betrieb und Wartung der technischen Einrichtung sind das bereitwillige Engagement der Mitarbeiter, umfassende Transparenz, geeignete Kommunikationsstrukturen, die Adaptierbarkeit der Technologie sowie wirtschaftlicher Spielraum im Falle der Identifizierung von Optimierungspotentialen für die erfolgreiche Umsetzung der Implementierungsmethodik essentiell.

Wirkungsvolle Werkzeuge, welche die Systemanalyse sowie die Definition und Ausarbeitung potentieller Optimierungsmaßnahmen in höchstem Maße unterstützen können, sind sogenannte Risikomanagementmethoden (RMM). Deren Anwendung kann durch die Berücksichtigung und Analyse potentieller Schadensvorgänge bzw. Ausfallursachen (Risikomanagement) in einem möglichst frühen Stadium des Entwicklungsprozesses eine Vielzahl von Fehlerquellen im Voraus eliminieren (Werdich, 2011). *„Die Zeiten, in denen Risiken allein mit Intuition, Erfahrung und Bauchgefühl gesteuert werden konnten, sind (leider?) lange vorbei. Heute sind unsere kognitiven Fähigkeiten und unser Reaktionsvermögen von der Komplexität und Dynamik der Risiko-Landschaft oft heillos überfordert“* (Werdich, 2011). Die Anwendung von RMM erhöht demnach die Wahrscheinlichkeit eines wartungsarmen bzw. robusten Betriebs, erfordert jedoch methodische Kenntnisse sowie umfassendes theoretisches und praktisches Wissen über das zu untersuchende System. Aufgrund der genannten Anforderungen können RMM nicht als integraler Bestandteil der hier beschriebenen Implementierungsmethodik vorausgesetzt werden. Gleichsam stellen die RMM das theoretische (in der Praxis jedoch häufig schwer zu erreichende) Optimum bei der Anwendung der Implementierungsmethodik dar.

Zu den bekanntesten Risikomanagementmethoden zählen bspw. die „Fehler Möglichkeiten und Einfluss Analyse“ (FMEA, englisch: *Failure Mode and Effects Analysis*), die „Fehlerbaumanalyse“ (FTA, englisch: *Failure Tree Analysis*) und die „Qualitätsfunktionendarstellung“ (QFD). Da neben der Schaffung eines möglichst robusten Systems der Transfer des systemspezifischen *Knowhows* vom Entwickler zum Betreiber sowie zu weiteren Multiplikatoren ein zentraler Bestandteil der hier diskutierten Implementierungsmethodik ist, stellt die FMEA die am besten geeignete Methode dar. Grundsätzlich ist eine FMEA eine Methode zur Qualitätssicherung und Risikobewertung, welche u.a. eine äußerst planbare, übersichtliche, nachvollziehbare und zielorientierte Implementierung einer Konstruktion (Konstruktions-FMEA) oder eines Systems (System-FMEA) ermöglicht. Mithilfe dieser Methodik können bereits in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses technische Schwachstellen identifiziert und somit das Fehler- bzw. Ausfallpotential des Produktes bzw. Systems deutlich reduziert werden. Des Weiteren können mittels FMEA auch menschliche Fehler beim Bedienen eines technischen Systems untersucht und bewertet werden (Human-FMEA). Im Hinblick auf die Implementierung von WPS kommt insbesondere der System-FMEA, bei der die Fragestellung *„Wurden alle Anforderungen an das Produkt im Konzept berücksichtigt?“* im Fokus steht, eine große Bedeutung zu (Werdich, 2011).

Aufgrund ihrer strukturierten Form führt die FMEA durch die Dokumentation des gesamten Entwicklungsprozesses zu einem transparenten und umfassenden Wissenstransfer, wodurch das *Capacity Development* erheblich unterstützt wird. Insbesondere für Multiplikationsvorhaben birgt eine FMEA-basierte Dokumentation aus Vorgängerprojekten erhebliche Vorteile, da hierdurch sämtliche *„Lessons Learned“* Eingang in den neuen Entwicklungsprozess finden können.

Dies kann am Beispiel eines WPS erläutert werden. Wenngleich die Grundstruktur dieses Teilsystems (PAT, Förderpumpe, Kupplung(en), ggf. Getriebe) vorbestimmt ist, so können durch die Erstellung einer Konstruktions-FMEA die einzelnen Komponenten anwendungsspezifisch und bestmöglich auf die jeweiligen Bedingungen (z.B. Umgebungstemperatur, Luftfeuchte usw.) abgestimmt werden. Diese Konstruktions-FMEA kann anschließend für potentielle Multiplikatoren zugänglich gemacht werden, wodurch bei Folgeprojekten irrelevante Bereiche (z.B. Getriebe, falls nicht benötigt) gelöscht und die Fehlerbewertungen auf die lokalen Bedingungen angepasst werden können. Ergänzend kann weiterhin eine System-FMEA erarbeitet werden, welche das gesamte WPS, bestehend aus mehreren parallelgeschalteten Modulen, beschreibt.

5.3.6 Anwendung des Implementierungsansatzes

Analog zu den Prinzipien des KVP wird für die hier vorgestellte Methodik kein Abbruchkriterium definiert, da eine iterative Anwendung über die gesamte Lebensdauer der Fördereinrichtung vorgesehen ist. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass die jeweiligen Standortbedingungen erheblichen Einfluss drauf haben welcher Optimierungsgrad mit einer bestimmten Anzahl an Iterationsstufen erzielt werden kann. Demzufolge kann hierzu keine allgemeine Aussage getroffen werden, sondern die Entscheidung zur Durchführung weiterer Anpassungsmaßnahmen soll Fallabhängig durch eine Aufwand-Nutzen-Betrachtung getroffen werden (siehe Abschnitt „Finanzen“, Kapitel 5.3.1).

5.4 Dimensionierung eines WPS

5.4.1 Hydraulische Bemessung

Die nachfolgend vorgestellte Methodik zur Dimensionierung eines WPS wurde mit Unterstützung der KSB AG im Rahmen der Dissertation ausgearbeitet und basiert auf den in Kapitel 3.6 genannten Bemessungsgrößen Ausbaudurchfluss Q_A , Fallhöhe H_T , Förderhöhe H_P und Fördermenge Q_P . Sie beschreibt zunächst ein Vorgehen zur Maschinenvorauswahl (siehe Kapitel 5.3.1), kann jedoch auch zur anschließenden Auslegung des gesamten Fördersystems angewandt werden (siehe Kapitel 5.3.2). Übergeordnete Ziele sind dabei die Schaffung eines robusten und gleichzeitig effizienten Systems, welches möglichst ganzjährig betriebsfähig ist und eine hohe Flexibilität zur Nutzung des jahreszeitlich schwankenden Wasserdargebots aufweist.

$$Q_T = Q_A \left(1 - \frac{H_T \eta_{ges}}{H_T \eta_{ges} + H_P} \right) \quad (5.1)$$

$$Q_P = Q_A \left(\frac{H_T \eta_{ges}}{H_T \eta_{ges} + H_P} \right) \quad (5.2)$$

Die maßgebende Bemessungsgröße für das Einzelmodul bzw. im Falle mehrerer parallel geschalteter Module für das Gesamtsystem ist der Ausbaudurchfluss Q_A . Das PAT-Schluckvermögen Q_T sowie die Pumpenfördermenge Q_P stehen gemäß Gleichung (5.1) und (5.2) in linearer Abhängigkeit zum Ausbaudurchfluss. Beide Gleichungen gehen aus der Energiebilanz des Fördermoduls, wie in Gleichung (3.8) dargestellt, hervor.

5 Ansatz zur Technologieimplementierung in der Wasserförderung

I.A. wird der Ausbaudurchfluss einer Wasserkraftanlage auf Basis der Dauerlinie für den betreffenden Standort gewählt. Hierbei wird eine Mindestüberschreitungsdauer im Hinblick auf einen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht nachhaltigen Betrieb festgelegt (bspw. liegt die geforderte Überschreitungsdauer bei Flusskraftwerken in Mitteleuropa bei 30 bis 60 Tagen). Bei Standorten, welche durch stark variierenden Abfluss gekennzeichnet sind (bspw. tropische Karstlandschaften), ist die Festlegung des Bemessungsabflusses aufgrund der Häufigkeit und hohen Gradienten der Abflussschwankungen sehr anspruchsvoll.

Liegt der Ausbaudurchfluss deutlich über dem zu erwartenden Mindestabfluss Q_{min} , so sollte zur Gewährleistung der ganzjährigen Betriebsfähigkeit mindestens ein Modul auf Q_{min} ausgelegt werden. Andernfalls können ein zeitweiser Wirkungsgradrückgang, (unzulässig) langanhaltender Teillastbetrieb sowie (erhebliche) Standzeiten nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin kann bei eingeschränkter Datenverfügbarkeit und -güte der angenommene Mindestabfluss durch einen Sicherheitsfaktor S rechnerisch reduziert werden, wonach sich der nutzbare Mindestabfluss $Q_{min,S}$ gemäß Gleichung (5.3) ergibt. Bei Unterschreitung des realen Mindestabflusses ist somit der Dauerbetrieb nicht notwendigerweise gefährdet. Da Sicherheitsfaktoren kleiner 1,5 eine verlässliche Datengrundlage bzw. präzise Analysemethoden erfordern, um die Bedingungen für eine technische Anwendung beschreiben zu können, muss der Wert letztlich in Abhängigkeit der Datengüte gewählt werden. Er sollte jedoch auch nicht zu hoch angesetzt werden, da hierdurch der Nutzungsgrad des Wasserdargebots verringert wird. Bei der Festlegung von Q_A gilt es weiterhin zu berücksichtigen, dass im Überschreitungsfall die überschüssigen Wassermengen ebenfalls abgeführt werden müssen. Um den Überlastbetrieb des WPS vermeiden zu können, ist demnach die Implementierung eines zusätzlichen Entlastungssystems erforderlich.

$$Q_{min,S} = \frac{Q_{min}}{S} \quad (5.3)$$

Weitere naturräumliche Einflussgrößen für die Berechnung von PAT-Schluckvermögen und Fördermenge sind die Fallhöhe H_T sowie die Förderhöhe H_P . Letztere sollte unter Berücksichtigung des geplanten Gesamtsystems auch einen Verlustterm für die zu erwartenden strömungsbedingten Energieverluste beinhalten. Da der Verlustterm vom Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit im Rohrsystem abhängt, muss die Fördermenge gemäß Gleichung (5.2) näherungsweise abgeschätzt werden. Hierbei spielt es keine Rolle, ob diese Fördermenge später durch ein einzelnes oder durch mehrere parallel geschaltete Module geleistet wird.

Als letztes gehen in die Berechnung von Q_T und Q_P auch maschinenspezifische Größen in Form von PAT- und Pumpenwirkungsgrad ein. Da diese Werte bei der Vorauslegung zunächst noch unbekannt sind müssen Annahmen getroffen werden. PAT-Wirkungsgrade liegen i.A. zwischen 70 % und 90 % (Mutschmann und Stimmelmayer, 2011), bei Förderpumpen zwischen 60 % und 90 % (Fritz et al., 2012). Eine realistische Auslegung der Maschinen bzw. die Abschätzung der Wirkungsgrade erfordert die Berücksichtigung der Baugrößen. I.d.R. entsprechen die Untergrenzen kleinen, die Obergrenzen großen Maschinen (extrem geringe Abflüsse führen zu sehr kleiner Baugröße, wodurch der Wirkungsgrade auf bis zu 50 % zurückgehen kann).

Somit stehen alle Größen zur Berechnung von Q_T und Q_P zur Verfügung. Offene Fragen sind jedoch weiterhin, ob das WPS mit oder ohne Getriebe ausgestattet und auf welche Modulanzahl das Schluckvermögen und die Fördermenge aufgeteilt werden sollen.

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt mithilfe der spezifischen Drehzahl n_q , welche für beide Maschinen gemäß Gleichung (3.5) bestimmt werden kann. Zur Berechnung fehlen letztlich noch die Betriebsdrehzahlen, deren Festlegung jedoch eine der schwierigsten Aufgaben innerhalb des Auslegungsprozesses für WPS ist. Hierzu müssen die Kennlinien von PAT und Förderpumpe aufeinander abgestimmt werden, was aufgrund der Fülle infrage kommender Maschinen, Betriebsdrehzahlen usw. den Einsatz computergestützter Berechnungsprogramme nahezu unumgänglich macht. Für den Regelbetrieb von Kreiselpumpen können Kennlinien i.d.R. von den Herstellern bezogen werden. Für den inversen Betrieb sind diese Informationen jedoch häufig nicht verfügbar und müssen gemäß den Angaben in Kapitel 3.4.1 rechnerisch ermittelt werden. Liegen Kennlinien für beide Betriebsfälle vor, muss Gleichung (3.8) zufolge nach Betriebspunkten gesucht werden bei denen die von der PAT abgegebene Leistung mit der von der Pumpe aufgenommenen Leistung übereinstimmt. Die jeweiligen Randbedingungen können dabei zu verschiedenen realisierbaren Maschinenkonfigurationen führen. Den Erfahrungen aus *Bribin* zufolge gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die direkte Kopplung von PAT und Förderpumpe nach Möglichkeit einer Lösung mit Getriebe vorgezogen werden sollte, da dessen Einsatz zu einem komplexeren und somit weniger robusten Gesamtsystem führt.

Definitionsgemäß sind für eine PAT vergleichsweise hohe spezifische Drehzahlen (großes Schluckvermögen, geringe Fallhöhe), für eine Förderpumpe ein niedriges n_q (geringe Fördermenge, große Förderhöhe) zu erwarten. Angaben der KSB AG zufolge liegt der technisch-wirtschaftliche Bereich für das n_q von Kreiselpumpen zwischen 8 und 110 min^{-1} . Oberhalb wird die Machbarkeit durch die zunehmende Baugröße limitiert (u.a. bzgl. Handhabbarkeit auftretender Kräfte); unterhalb ist das Verhältnis von Austrittsquerschnitt zu Gehäusegröße zunehmend ungünstig, wodurch insbesondere die Fertigbarkeit eingeschränkt wird.

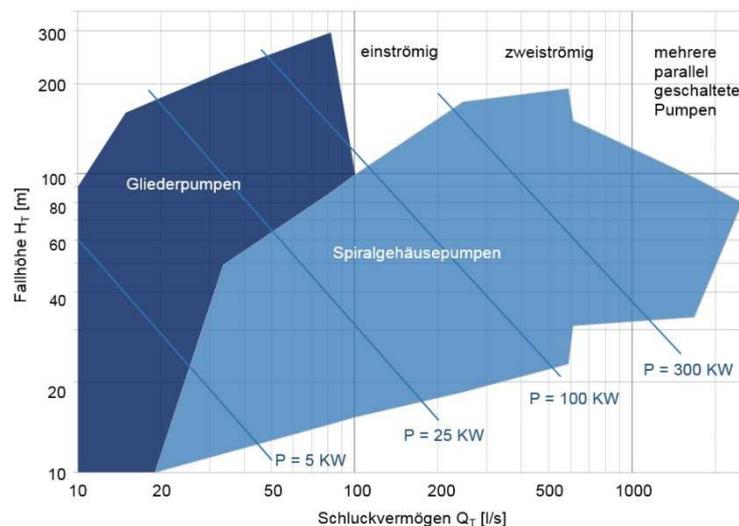


Abbildung 5.2: Einsatzbereich verschiedener Pumpentypen für den inversen Betrieb, verändert nach KSB AG (2012)

Abbildung 5.2 zeigt die Einteilung verschiedener PAT-Bauformen und die zugehörigen Anwendungsbereiche sowie das Abflussspektrum, welches den Einsatz mehrerer parallel geschalteter Maschinen erfordert bzw. begünstigt. Ist die spezifische Drehzahl für die PAT-Anwendung zu groß, so kann unter Annahme einer bestimmten Fallhöhe durch den Einsatz einer zweiströmigen oder von mehreren kleinen, parallel betriebenen Maschinen eine Reduzierung von n_q erreicht werden. Somit wird bei der Berechnung von n_q die Durchflussmenge durch zwei (zweiströmige Maschine) bzw. durch die Anzahl der Maschinen geteilt.

Am Beispiel der Anlage *Bribin* kann verdeutlicht werden, dass im Falle einer erheblichen Überschreitung der genannten Obergrenze für die spezifische Drehzahl eine Aufteilung des Schluckvermögens auf mehrere Maschinen unumgänglich ist. Würde nur eine PAT eingesetzt, so ergibt sich bei einer Bemessungsfalhöhe von $H_T = 15$ m, einem Ausbaudurchfluss von $Q_A = 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und einer Maschinendrehzahl von $n = 1.200 \text{ min}^{-1}$ ein n_q von 222 min^{-1} . Erst beim Einsatz von fünf baugleichen Maschinen liegt die spezifische Drehzahl im zulässigen Bereich, genauer bei ca. 100 min^{-1} .

Wird der Ausbaudurchfluss der Gesamtanlage auf mehrere Module aufgeteilt, so können bei geringeren Abflüssen Einzelmodule abgeschaltet werden. Hierbei führt der Einsatz baugleicher Module zu einer möglichst geringen Komplexität des Gesamtsystems sowie zu vergleichsweise einfachen Betriebsstrategien. Eine Aufteilung auf Module unterschiedlicher Baugröße kann eine effizientere Nutzung des Abflusssdargebots ermöglichen, jedoch sind hierzu u.U. ein höherer Automatisierungsgrad des Regelungssystems oder im Falle des manuellen Betriebs umfassendere betriebliche Kenntnisse sowie ein hohes Engagement des Personals erforderlich. Da der Einsatz unterschiedlicher Module weiterhin die Ersatzteilhaltung sowie die Instandhaltung erschwert, kann bei Ausfall eines Moduls der theoretische Effizienzvorteil hinfällig sein. Im Hinblick auf die dezentrale Anwendung in entlegenen Regionen bzw. in Schwellen- und Entwicklungsländern ist daher der Einsatz unterschiedlicher Module deutlich zu hinterfragen.

Wenngleich die Aufteilung auf mehrere Maschinen eine höhere betriebliche Flexibilität bei Abflussschwankungen gewährt kann die Entscheidung letztlich nicht immer rein auf Basis der hydraulischen Bedingungen getroffen werden. So gilt es häufige Start- und Stoppvorgänge möglichst zu vermeiden, da hierbei Kreiselpumpen einer höheren mechanischen Belastung als im Dauerbetrieb ausgesetzt sind. Bspw. beträgt das Anfahrtdrehmoment bis zu 300 % vom Nenndrehmoment und führt zu hoher Belastung von Welle, Lager und Dichtungen.

Auch auf Seiten der Förderpumpe können sich je nach Randbedingungen ungünstige bzw. zu kleine spezifische Drehzahlen ergeben. Eine Erhöhung kann mittels mehrstufiger Gliederpumpen erfolgen, wobei sich die Gesamtförderhöhe proportional auf die einzelnen Stufen aufteilt. Bei der Berechnung von n_q wird demnach lediglich die Förderhöhe einer Stufe berücksichtigt. Reicht auch diese Maßnahme nicht aus, so ist eine Drehzahlerhöhung mittels Getriebe unumgänglich.

Generell führt der Einsatz eines Getriebes zu einer technisch und wirtschaftlich anspruchsvollen Lösung, was im Gegensatz zur Forderung nach einem robusten Konzept mit möglichst geringer Komplexität steht. Neben Fällen, in denen eine Drehzahlübersetzung zur Einhaltung des zulässigen n_q -Bereichs bei beiden Maschinen zwingend erforderlich ist, gibt es auch Anwendungen, bei denen der Getriebeeinsatz aus energetischer Sicht sinnvoll ist. Werden beide Maschinen aufgrund der Drehzalanpassung im bzw. nahe des jeweiligen Optimums betrieben, so kann es zu einer Überkompensation der mit dem Getriebeeinsatz verbundenen Energieverluste (durch Planschverluste, Reibungsverluste, Abwärme) kommen. Trifft dies zu, ergibt sich im Vergleich zur Kopplung ohne Getriebe ein höherer Gesamtwirkungsgrad. Dieser Zusammenhang kann allerdings nicht verallgemeinert werden und bedarf einer Einzelfallprüfung.

Da während des Dimensionierungsprozesses Annahmen getroffen werden müssen (bzgl. Maschinenwirkungsgrad, Verlusthöhe, Mindestabfluss usw.) ist i.d.R. eine Wiederholung der Berechnungsschritte erforderlich. Somit konkretisiert sich die Maschinenauswahl erst nach und nach, wobei sich Änderungen des anfänglichen Designs ergeben können (bspw. bzgl. Maschinentyp, Baugröße, Getriebeeinsatz, Modulanzahl usw.).

5.4.2 Bewertung der Feststoffbeladung

Mithilfe der zuvor beschriebenen hydraulischen Bemessung werden Maschinen ausgewählt, welche unter den jeweiligen Standortbedingungen eine kontinuierliche, effiziente und möglichst flexible Wasserförderung ermöglichen. Um auch an sehr entlegenen Standorten einen nachhaltigen Betrieb des WPS zu gewährleisten, muss im Weiteren die Robustheit der eingesetzten Maschinen näher betrachtet werden. Diese ergibt sich vorrangig durch die Widerstandsfähigkeit der Maschinen gegenüber der Feststoffbeladung, welche bei der Wasserentnahme aus natürlichen Fließgewässern unvermeidlich ist. So gilt es bei jeder Anwendung zu untersuchen, ob die Herstellervorgaben zur zulässigen Schwebstoffkonzentration und Grenzkorngröße eingehalten werden können. Eine dauerhafte Überschreitung dieser Grenzwerte hat erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer der Maschinen.

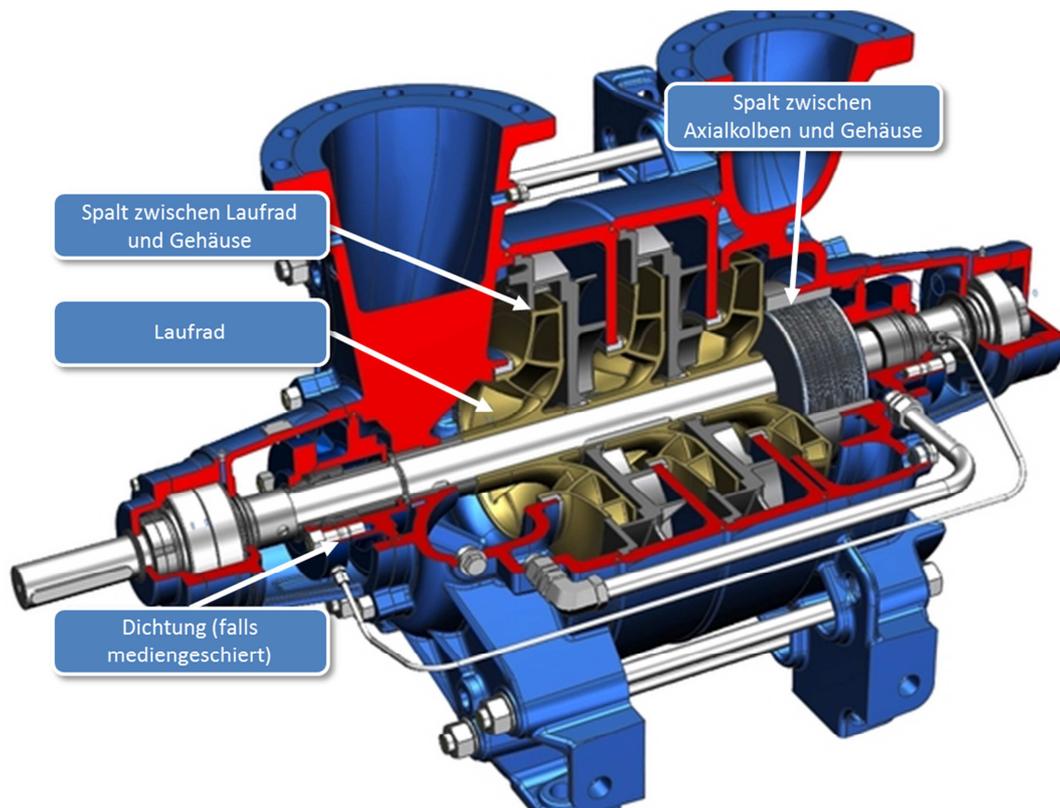


Abbildung 5.3: Exemplarische Darstellung kritischer Stellen einer Gliederpumpe in Bezug auf die Feststoffbeladung (hier im Beispiel Typ Multitec der KSB AG³⁵)

Nachfolgend werden die in Abbildung 5.3 dargestellten kritischen Komponenten, deren frühzeitiges Versagen bei unzulässig hohem Feststoffeintrag wahrscheinlich ist, beschrieben. Ergänzt wird die Beschreibung durch Maßnahmen zur Reduzierung des Feststoffeinfluss.

- **Laufrad:** Als strömungsführendes Bauteil kann das Laufrad bei dauerhafter Beaufschlagung mit feststoffbeladenem Fluid durch Abrasionsschäden ausfallen (der Schadensvorgang ist vergleichbar mit Sandstrahlen von Bauteilen). Hierbei spielt sowohl die Schwebstoffkonzentration als auch die Korngrößenverteilung eine maßgebliche Rolle.

³⁵ http://www.ksb.com/linkableblob/ksb-ca-en/2627978-714026/lightboxLs/Figure_1_Cut_Away_Multitec-lightboxLs.jpg (16.12.2015)

Kann der Feststoffeintrag trotz einer Abscheidung mittels vorgeschaltetem Sandfang, Hydrozyklon o.ä. nicht vermieden werden, so sollte eine möglichst hochwertige Legierung als Laufradwerkstoff gewählt werden. Wenngleich dies die Belastbarkeit erhöht, so sind mit dieser Maßnahme auch (erhebliche) Mehrkosten verbunden, die es zu prüfen gilt.

- **Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse:** Wird die Maschine durch eine Vielzahl von Partikeln mit einem Durchmesser über der Grenzkorngröße beladen, so kann das „Verklemmen“ von Partikeln zu einer Vergrößerung des Spaltes zwischen Laufrad und Gehäuse führen (das Spaltmaß liegt i.d.R. bei wenigen Zehntelmillimetern). Dies hat zwar keinen Bauteilausfall zur Folge, jedoch nimmt die Rückströmung von der Druck- zur Saugseite zu und infolge dessen verringert sich der Wirkungsgrad. Neben der Partikelgröße ist bei diesem Vorgang auch das Material relevant. So sind bspw. durch organische Feststoffe keine oder nur geringe Schäden zu erwarten; Quarze hingegen führen unweigerlich zu einer Aufweitung des Ringspalts.

Um eine sukzessive Veränderung der Betriebseigenschaften auszuschließen, kann die Maschine mit vergrößertem Spaltmaß gefertigt werden. Wenngleich hierdurch größere Partikel ungehindert den Spalt passieren können, so wird der Wirkungsgrad von Beginn an herabgesetzt. Daher wird häufig die „natürliche“ Spaltaufweitung hingenommen, wobei es zu prüfen gilt bis zu welchem Maß dies toleriert werden kann.

- **Axialschubentlastung:** Der Axial Schub ist die Resultierende aus allen auf einen Pumpenläufer wirkenden Axialkräften, welche bspw. aufgrund des Druckunterschieds auf beiden Seiten eines Laufrads entstehen. Diese Kräfte können durch ein Axiallager aufgenommen werden. Um dessen Baugröße zu begrenzen, ist eine Einrichtung zur Kompensierung des Axialschubs erforderlich. Übliche Methoden sind bspw. (1) die gegenläufige Anordnung von Laufrädern, (2) ein Ausgleich am einzelnen Laufrad durch Entlastungsbohrungen sowie (3) der Gesamtausgleich durch Entlastungskolben. (Hellmann, 2009)

Maßnahme (1) führt generell zu einer vollständigen Kompensation des Axialschubs. Durch die gegenläufige Anordnung der Laufräder wird die Maschine jedoch deutlich komplexer. Weiterhin ist nach wie vor ein Axiallager erforderlich, falls eine Stufe kavitiert. (Hellmann, 2009)

Maßnahme (2) führt durch Rückströmung von der Druck- zur Saugseite des Laufrads, analog zur Rückströmung durch den Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse, zu einem Schubausgleich. Dies stellt eine sehr robuste, bei großer Stufenanzahl jedoch auch eine sehr aufwändige und teure Lösung dar, da jedes Laufrad einzeln gebohrt werden muss. Auch die Ersatzteilbeschaffung wird erschwert, da es sich nicht mehr um Standardlaufräder handelt. Weiterhin sind Wirkungsgradeinbußen unvermeidlich und können im Vorfeld nur näherungsweise berechnet werden.

Maßnahme (3) erfordert im Betrieb einen Entlastungsstrom durch den Spalt zwischen rotierenden und stationären Teilen der Entlastungseinrichtung, wobei der Strom stark abgedrosselt wird. Dieser Druckverlust bewirkt eine resultierende Axialkraft auf die Entlastungseinrichtung, die dem Axial Schub der Laufräder entgegengesetzt ist und somit für Ausgleich sorgt. Entlastungseinrichtungen finden i.d.R. bei Hochdruckanlagen mit sehr hohen Axialschüben Anwendung. (Hellmann, 2009)

Welche Maßnahme bzw. Entlastungsform letztlich zielführend ist, muss für jeden Einzelfall geprüft werden.

- **Wellendichtung:** Um das Eindringen von Luft ausschließen sowie bei umweltverträglichen Fördermedien das Austreten begrenzen zu können, muss die Welle einer Kreiselpumpe zum Gehäuse hin abgedichtet werden. Erfolgt die Abdichtung bspw. durch berührende Dichtungen wie Stopfbuchspackungen oder Gleitringdichtungen, so ist aufgrund der Relativbewegung der Dichtelemente eine Mindestleckage zur Schmierung und Kühlung nötig. Feststoffbeladene bzw. abrasive Medien können zu einer Schädigung der Dichtflächen und letztlich zum Ausfall der Dichtung führen. (Hellmann, 2009)

Um das Schädigungspotential zu verringern, können statt den häufig standardmäßig verwendeten Graphitbauteilen bspw. keramische Gleitringe z.B. aus Siliziumkarbid eingesetzt werden. Diese zeichnen sich durch eine höhere mechanische Belastbarkeit und somit höhere Lebensdauer aus.

Werden die zuvor genannten kritischen Komponenten unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen ausgelegt, kann eine Beeinträchtigung der Lebensdauer des WPS begrenzt, nicht aber ausgeschlossen werden. Demzufolge sind im Hinblick auf die dauerhafte Funktionserfüllung des WPS regelmäßige Wartungsmaßnahmen unerlässlich

5.4.3 Automatisierung des Dimensionierungsprozesses

Die bisherigen Beschreibungen des Dimensionierungsprozesses lassen erahnen, dass die sachgemäße Entwicklung eines WPS ein aufwändiges Verfahren ist. Um bei der Auswahl möglichst viele Maschinen sowie Kombinationen mit und ohne Getriebe berücksichtigen zu können, ist eine computergestützte Automatisierung dieses Vorgangs sinnvoll. In diesem Zusammenhang wurde durch eine Masterarbeit (Betreuung erfolgte im Rahmen der vorliegenden Dissertation) eine *Software* (Programmiersprache C++) auf Basis des zuvor beschriebenen Dimensionierungsprozesses entwickelt (Kleine, 2015). Diese kann zunächst als Datenbank beschrieben werden, in der die maßgebenden Eigenschaften verschiedener Kreiselpumpen hinterlegt werden können. So wurden für insgesamt vier Baureihen der KSB AG (Propellerpumpe Amaline, Tauchmotorpumpen Amarex KRT und Amacan, Brunnenpumpe UPA) die Kennlinien für den Pumpen- und PAT-Betrieb (letztere wurden rechnerisch ermittelt) sowie Informationen in Bezug auf die maximal zulässige Stufenzahl, Baugröße usw. integriert. Durch zusätzliche Eingabeparameter kann weiterhin manuell entschieden werden, ob bzw. bis zu welcher Übersetzung Varianten mit Getriebe berücksichtigt werden sollen.

Weiterhin ermöglicht die *Software* die Berechnung möglicher Modulvarianten. Hierbei gehen als primäre Eingabegrößen die Fall- und Förderhöhe, das maximal zulässige PAT-Schluckvermögen sowie die gewünschte Fördermenge ein. Für die genannten Werte kann ein Spektrum definiert werden, innerhalb dessen nach möglichen Treffern gesucht werden soll. Als Ergebnis werden rechnerisch mögliche Modulvarianten einschließlich aller maßgebenden Kennwerte und Eigenschaften ausgegeben (Q_T , Q_P , H_T , H_P , n_T , n_P , i , Baugröße usw.). Je nach Priorität können die Ergebnislisten für die Wahl des bestmöglichen WPS sortiert werden (im Falle eines Implementierungsvorhabens bei eingeschränkten Platzverhältnissen kann bspw. nach der geringsten Baugröße gesucht werden).

Die Eingabemaske lässt sich problemlos durch weitere Parameter erweitern, wodurch immer spezieller nach Lösungen gesucht werden kann. Sofern eine Maschine auf einem Prüffeld vermessen wurde können die gerechneten PAT-Kennlinien nach und nach ersetzt werden. Ebenso lassen sich Maschinen weiterer Hersteller hinterlegen, wodurch das Spektrum möglicher WPS-Varianten sukzessive erweitert wird.

6 Innovative Technologietransferansätze

F&E-Vorhaben haben das Ziel vielversprechende Technologien und Konzepte für verschiedenste Sektoren (bspw. Wasser- und Energieversorgung, Nahrungsmittelproduktion) zu erarbeiten, welche für das tägliche (Über-) Leben von Millionen von Menschen von großer Bedeutung sein können. Nicht selten existieren diese Entwürfe jedoch lediglich auf dem Papier da eine bauliche Umsetzung nicht vorgesehen ist bzw. im Rahmen der Laufzeit des Vorhabens und durch die verfügbaren finanziellen Mittel nicht geleistet werden kann. Demzufolge gibt es häufig keine praktischen Erfahrungswerte, welche als Grundlage zur Technologieanwendung geschweige denn zur Multiplikation herangezogen werden können. Zur nachhaltigen Technologieimplementierung sind daher geeignete Strategien gefragt, welche eine Validierung unter realen Bedingungen sowie die Verbreitung der theoretischen Ansätze ermöglichen.

Hier heben sich die F&E-Aktivitäten des Institutes für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) deutlich von anderen F&E-Unternehmungen ab, da sie die exemplarische Implementierung der geleisteten Entwicklungen vorsehen. So konnte bspw. im Rahmen des in Kapitel 2.6 vorgestellten Verbundvorhabens „IWRM Indonesien“ die zuvor beschriebene Realisierung der Pilotanlage *Bribin* sowie deren umfassende betriebliche Analyse realisiert werden. Die dabei gewonnenen Erfahrungen belegen den in Kapitel 2.5 beschriebenen Ansatz, dass eine erfolgreiche Technologieanwendung untrennbar mit einem umfassenden Technologie- („Hardware“ = Maschinen) und Wissenstransfer („Software“ = Implementierungsansatz, Betriebsstrategie und -erfahrung) verbunden ist. In diesem Zusammenhang werden nachfolgend zwei Multiplikationskonzepte vorgestellt, die im Rahmen der IWRM-Aktivitäten in Indonesien sowie innerhalb des Folgevorhabens im Norden Vietnams (BMBF-gefördertes Verbundvorhaben „Vietnamesisch-Deutsche Kooperation zur Entwicklung nachhaltiger Technologien für die Karstwasserwirtschaft“, KaWaTech) entworfen und umgesetzt wurden.

6.1 Demonstrationsanlage als Lehr-, Forschungs- und Anschauungsobjekt

Im Rahmen der zuvor genannten F&E-Vorhaben wurden zwei Förderanlagen weltweit erstmalig baulich umgesetzt. Aufgrund der Einzigartigkeit der Pilotanlagen musste bzw. muss (bei Abgabe der Dissertation sind die Implementierungsmaßnahmen des KaWaTech-Vorhabens noch nicht abgeschlossen) zunächst der Nachweis in Bezug auf die Funktionsfähigkeit erbracht werden. Um einen umfassenden Erkenntnisgewinn gewährleisten zu können, sollten bzw. sollen die Bau- und Betriebsphase durch vielfältige technische und betriebliche Analysen begleitet werden (siehe Kapitel 4 und 6.2). Sowohl die in *Gunung Sewu* errichtete Anlage *Bribin* als auch die im Norden Vietnams in der Karstregion *Dong Van* geplante Förderanlage *Seo Ho* (detaillierte Beschreibung folgt in Kapitel 6.2) wurden bzw. werden an sehr entlegenen Standorten realisiert, da sie hier neben der Validierung auch einem weiteren Nutzen in Form einer verbesserten Wasserversorgung der unter (akutem) Wassermangel leidenden Bevölkerung dienen sollen. Somit ist ein Test der Technologien unter „realen“ Einsatzbedingungen möglich. Aufgrund dieses

Einsatzzweckes eignen sich beide Einrichtungen grundsätzlich auch als Demonstrationsobjekte für potentielle Multiplikatoren. Dieser Nutzen wird jedoch durch die sehr entlegene Lage der Förderanlagen teilweise eingeschränkt. Demzufolge werden die bei diesen Pilotanlagen gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse bei Umsetzung und Betrieb vorrangig an die künftigen Betreiber sowie die in der Zielregion bzw. dem Zielland geschaffenen Netzwerke übermittelt.

6.1.1 Funktionsbeschreibung

Um die theoretischen Grundlagen und gleichzeitig die praktischen Erfahrungswerte in Bezug auf WPS einer Vielzahl weiterer Multiplikatoren zugänglich zu machen, sind zusätzliche Strategien erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Aktivitäten des IWRM-Indonesien-Vorhabens in Zusammenarbeit mit der Universität *Gadjah Mada* (UGM), *Yogyakarta*, Indonesien, eine Wasserförderanlage zu Demonstrations-, Lehr- und Forschungszwecken errichtet (Nestmann et al., 2015). Bereits in der Machbarkeitsstudie des IWG (2000 bis 2002) wurde ein alternatives Wasserförderkonzept zum „*Bribin*-System“ entwickelt, wonach zur Erzeugung der zum Antrieb von Wasserkraftmaschinen erforderlichen Druckhöhe eine hölzerne Druckrohrleitung entsprechend dem geodätischen Gefälle des Höhlenverlaufes verlegt wird. Der Grund, weshalb zwei unterschiedliche Konzepte entwickelt wurden, war, dass in Karstgebieten grundsätzlich das Risiko von Wasserverlusten über Klüfte und Porositäten des Felskörpers in Abhängigkeit von den jeweiligen geologischen Bedingungen besteht – wenngleich im Fall der Höhle *Bribin* die dauerhafte Stauhaltung erfolgreich nachgewiesen werden konnte.

Grundsätzlich kann das Förderkonzept „Holzdruckrohr“ für kurze Strecken mit hohem Gefälle zielführend sein. Wenngleich die fehlenden Speicher- bzw. Bewirtschaftungsmöglichkeiten nachteilig sein können, so ist es deutlich unabhängiger von den geologischen Randbedingungen. Zur Energiegewinnung werden, wie auch bei der Anlage *Bribin*, Pumpen im Turbinenbetrieb eingesetzt. Weiterhin bietet sich aufgrund der Unwegsamkeit und Enge in Karsthöhlen sowie den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten beim Verlegen einer Rohrleitung der Baustoff Holz an. Druckrohrleitungen aus Holz bestehen aus einzelnen Bohlen oder Kanthölzern, die im Vergleich zu Rohrsegmenten aus Stahl deutlich einfacher transportiert und in unwegsames Gelände eingebracht werden können. Die Dichtheit der Rohrleitung wird durch das Quellen des Holzes gegen Stahlringe gewährleistet. Durch die stete Sättigung des Holzes und den Schutz vor UV-Strahlung können ein Pilzbefall verhindert sowie die Alterung des Holzes verzögert und somit Lebensdauern von bis zu 100 Jahren realisiert werden.

Im Falle der geplanten Demonstrationsanlage fiel die finale Standortentscheidung auf ein Kanalsystem im nordöstlichen Teil des UGM-Campus' innerhalb des Stadtgebietes von *Yogyakarta*, welches überschüssiges Wasser von den Bewässerungseinrichtungen der naheliegenden Ackerflächen nördlich und westlich der Stadt sowie Regenwasser von verschiedenen Einrichtungen der Universität in den nahe gelegenen Fluss *Code* führt (siehe Abbildung 6.1). Der abschnittsweise ober- und unterirdisch verlaufende Kanal baut vor Erreichen des Flusses *Code* ein Gefälle von etwa 15 m über zwei hintereinander folgende Schussrinnen ab, da der Fluss in einem gegenüber dem Geländeniveau deutlich vertieften Bett verläuft. Der Bereich der ersten Schussrinne wurde als Standort für die zukünftige Anlage ausgewählt. Um den baulichen sowie den finanziellen Aufwand möglichst gering zu halten, wurde die bestehende Infrastruktur des Kanalsystems weitestgehend in das Analogendesign integriert. Die Aufrechterhaltung der ursprünglichen Funktion des Kanals war eine der zentralen Vorgaben in Bezug auf die Planung und Umsetzung des Vorhabens.



Abbildung 6.1: Standort der Demonstrationsanlage auf dem Campus der UGM³⁶, weiße Pfeile geben Fließrichtung an

Dank dieser zentralen und leicht zugänglichen Lage kann die geplante Wasserförderanlage ideal als Demonstrations-, Lehr- und Forschungsobjekt für das o.g. Förderkonzept verwendet werden. So soll mithilfe des Demonstrationsobjektes indonesischen Projektpartnern sowie Studenten die Funktionsweise einer Wasserförderanlage mit Holzdruckleitung und „Pumpe-als-Turbine“-Technologie nähergebracht werden und auch als Feldlabor zur Verfügung stehen. Neben Studenten und Mitarbeitern der UGM sind als weitere Zielgruppen örtliche Unternehmen und Behörden aus den Bereichen Bau-, Energie- und Wasserwirtschaft zu nennen. Durch die Anlage werden diesen Multiplikatoren die einfachen aber effektiven und robusten Technologien vorgestellt werden, um so Anreize für eine Vervielfältigung des gesamten Förderkonzeptes oder auch einzelner Technologien zu schaffen.

Anders als das Höhlenkraftwerk *Bribin* wurde diese Anlage nicht primär auf eine maximale Förderleistung projektiert. Stattdessen stehen Lern- und Demonstrationsaspekte durch aktive Teilnahme am Anlagenbetrieb im Vordergrund. Interessenten sollen demnach mittels praktischer Arbeiten wissenschaftliche Inhalte bzgl. Zusammenhänge der maßgebenden Betriebsparameter nähergebracht werden. Die Finanzierung des Baus wurde zu ca. 70 % durch das KIT und zu 30 % durch die UGM getragen. Mithilfe der Anlage soll ein grundlegendes Verständnis für das Prinzip „Wasserförderung durch Wasserkraft“, für Wasserkraft- und Wasserarbeitsmaschinen sowie für hydraulische Komponenten (Armaturen, Durchflussmesser usw.) vermittelt werden. Der Hauptfokus des Lehrbetriebes liegt auf der verwendeten PAT-Technologie und dem damit umgesetzten Wasserförderkonzept. Hierzu muss zunächst ein Grundwissen für die eingesetzten

³⁶ <http://www.googleearth.com>

6 Innovative Technologietransferansätze

Strömungsmaschinen und hydraulische Vorgänge geschaffen werden. Anhand von variierbaren Anlagenparametern können unterschiedliche Szenarien simuliert werden, um aufzuzeigen, wie die Maschinen auf veränderte Randbedingungen reagieren. Bspw. lässt sich die Fallhöhe, welche maßgeblich das PAT-Schluckvermögen und somit die generierbare Leistung bzw. den Förderstrom der mechanisch gekoppelten Förderpumpen bestimmt, über eine Wehranlage im Einlaufbecken variieren. Zudem können im sogenannten „Testbereich“ hydraulische Versuche durch austauschbare Rohrsegmente durchgeführt werden. Somit können unterschiedliche Strömungswiderstände und letztlich verschiedene Förderhöhen simuliert werden.

Die eintretenden Änderungen und die kausalen Zusammenhänge werden begleitend auf Postern erläutert, welche im Krafthaus sowie im Bereich der Wehranlage positioniert wurden (siehe Abbildung 6.2). Diese Poster wurden im Rahmen der Dissertation in Zusammenarbeit mit Studenten der Staatlichen Hochschule für Gestaltung Karlsruhe (HfG) ausgearbeitet und sollen im Weiteren bspw. bei studentischen Praktika als Unterrichtsmaterialien Verwendung finden.

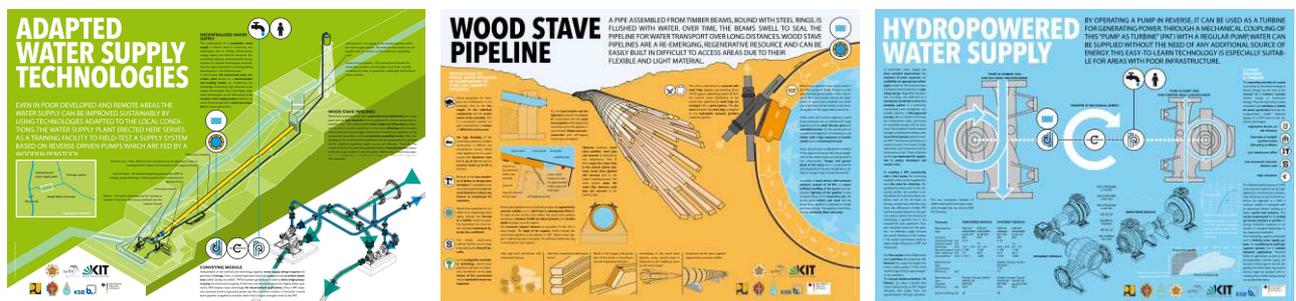


Abbildung 6.2: Wissenstransfer durch angepasste Schulungsposter (links: Allgemeine Funktionsbeschreibung; Mitte: Beschreibung des Holzdruckrohrs; rechts: Beschreibung des WPS)

6.1.2 Dimensionierung des WPS

Der Ausbaudurchfluss als maßgebende Bemessungsgröße für das WPS wurde im Rahmen von Messkampagnen ermittelt, welche in Kooperation mit Studenten und Mitarbeitern der UGM durchgeführt wurden. Das Schluckvermögen eines Einzelmoduls wurde auf den ermittelten Mindestabfluss von 20 l s^{-1} festgelegt, da kleinere Werte zu signifikanten Wirkungsgradeinbußen und geringen Fördermengen führen würden. Zur Festlegung der nutzbaren Fallhöhe wird nicht die durch die Geländevermessung ermittelte Fallhöhe von 10,7 m angesetzt, da dieses vorhandene Potential in der Praxis nicht vollständig für die spätere Energieumwandlung in der PAT sowie als Vordruck für die Förderpumpe zur Verfügung steht. Durch die Fluidreibung an Rohrwänden sowie an weiteren strömungsführenden Bauteilen wie Armaturen und Formstücken werden hydraulische Verluste erzeugt, wodurch sich die nutzbare Druckhöhe ergibt. Auf Basis hydraulischer Verlustberechnungen wurde die Fallhöhe auf 9,3 m bemessen. Die Förderhöhe der Pumpen kann bei dieser Anlage weitgehend frei gewählt werden, da die zur Verfügung stehende Leistung unter Berücksichtigung der hydraulischen Verluste auf Förderhöhe und Förderstrom aufgeteilt werden konnte. Aus didaktischen Gründen sollte das Wasser im Vergleich zum Oberwasserspiegel im Einlaufbecken auf eine deutlich größere geodätische Höhe gefördert werden. Basierend auf einer Betrachtung der Energiebilanz von PAT und Pumpe wurde eine Förderhöhe von 12,6 m festgelegt. Um aufzuzeigen, dass für einen Anwendungsfall unterschiedliche Ansätze zielführend sein können, wurde die Installation zweier Fördermodule mit unterschiedlicher Priorisierung der technischen Eigenschaften vorgesehen (siehe Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4).

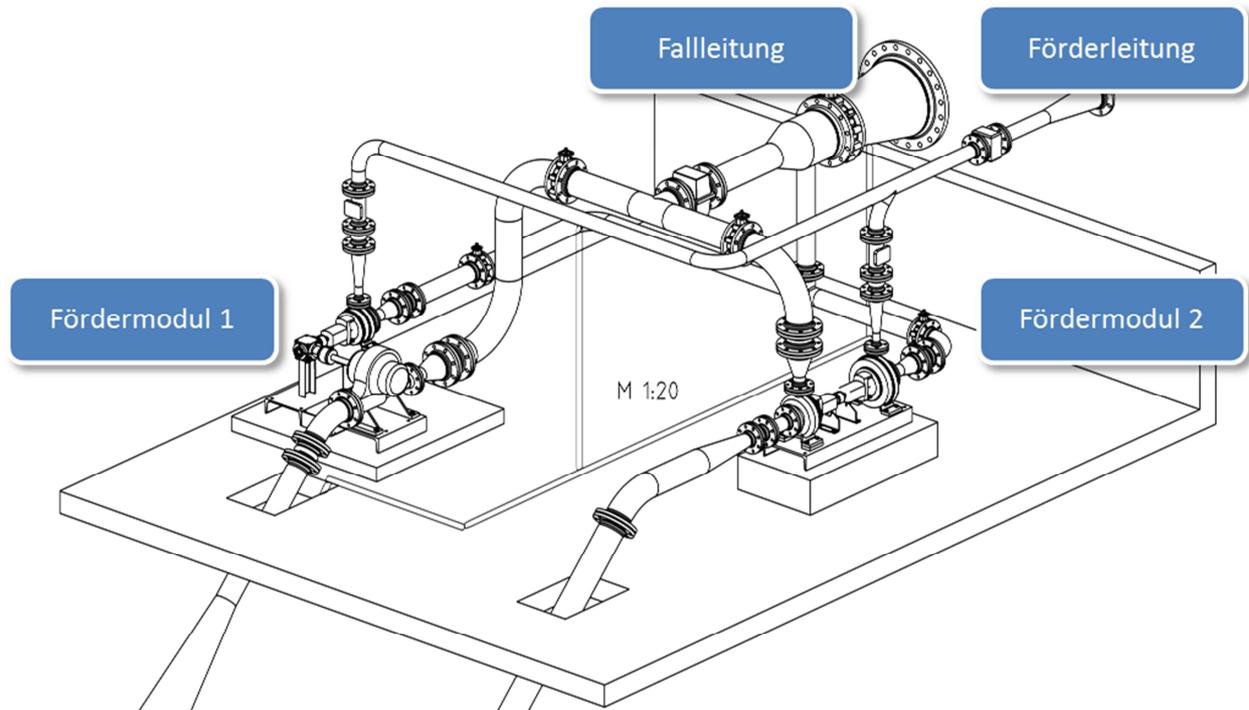


Abbildung 6.3: Aufbau des WPS an der UGM mit zwei parallel geschalteten Fördermodulen

Eines der Module wurde auf hohe „Effizienz“, das zweite auf hohe „Robustheit“ ausgelegt. Die Maschinenauswahl wurde in Kooperation mit dem Industriepartner und Maschinenhersteller, der KSB AG, durchgeführt. Modul 1 besteht aus zwei Spiralgehäusepumpen: Einer einstufigen, zweiflutigen OMEGA 80-210 A als PAT sowie einer einflutigen, einstufigen, horizontal gelagerten ETANORM-Pumpe 40-160 als Förderpumpe. Die Maschinen beider Module sind über eine Eurogrip-Steckkupplung der Firma Walther Flender GmbH mechanisch verbunden. Dieser Kupplungstyp wurde auf Basis der Erfahrungen aus *Bribin* gewählt, da er durch hohe Versatztoleranzen und somit durch hohe Robustheit besticht.

Da die Drehzahlen der optimalen Betriebspunkte der Maschinen verschieden sind erfolgt bei Modul 1 die nötige Anpassung der Wellendrehzahlen durch ein Getriebe mit einer Übersetzung von 1:1,5 (Turbinen- zu Pumpendrehzahl) und einem Wirkungsgrad von 91 %. Trotz der durch den Einsatz des Getriebes entstehenden zusätzlichen Verluste wird durch die höheren Einzelwirkungsgrade der Maschinen ein höherer Gesamtwirkungsgrad des Moduls erreicht.



Abbildung 6.4: Maschinenspezifikation der Module 1 (links) und 2 (rechts)

Basierend auf den Erfahrungen aus *Bribin* weist das zweite Modul eine robuste Bauweise auf, welche unter anspruchsvollen Bedingungen implementiert werden kann. Um die finanziellen und technischen Anforderungen möglichst gering zu halten, werden hierzu zwei Pumpen der Baureihe ETANORM eingesetzt (PAT: ETANORM 5-160, Förderpumpe: ETANORM 40-250). Auf den Einsatz eines Getriebes zur Anpassung der Drehzahlen wird zugunsten eines einfacheren und robusteren Aufbaus verzichtet. In Kauf genommen werden dabei ein geringfügig verminderter Modulwirkungsgrad sowie eine reduzierte Förderleistung.

Beide Module sowie die Einzelmaschinen wurden vor der Auslieferung nach Indonesien auf dem Forschungsprüffeld der KSB AG umfassend getestet. Durch diese Prüfungen konnten die theoretischen Leistungsdaten vollständig validiert werden (siehe Tabelle 6.1). Dabei führten die geringen Baugrößen erwartungsgemäß zu vergleichsweise niedrigen Einzelwirkungsgrade zwischen 58,5 % und 76,9 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der geringen Größe die inneren hydraulischen Verluste (z.B. Reibungsverluste, Umlenkverluste) im Vergleich zur erbrachten Leistung erheblich zu Buche schlagen. Der Gesamtwirkungsgrad der beiden Module liegt demzufolge bei 45 % (Modul 1) bzw. 42 % (Modul 2).

Tabelle 6.1: Prüffeldergebnisse der Module für die Demonstrationsanlage an der UGM, bereitgestellt durch KSB AG

Strömungsmaschine	Fördermodul 1		Fördermodul 2	
	PAT	Pumpe	PAT	Pumpe
	OMEGA 80-210 A	ETANORM 40-160	ETANORM 65-160	ETANORM 40-250
Fall- bzw. Förderhöhe [m]	9,0	13,3	9,0	13,3
Durchfluss [m³ s⁻¹]	74,5	22,7	72,1	20,5
Prüfdrehzahl [min⁻¹]	1.515	1.450	1.515	1.450
Max. Wirkungsgrad [-]	76,9	66,3	75,0	58,5
Wirkungsgrad Getriebe [-]	91 %		-	
Gesamtwirkungsgrad [-]	45 %		42 %	

Im Rahmen der Anlagenplanung für den neuen Standort auf dem Campus der UGM wurde von Seiten des KIT in iterativer Abstimmung mit den zuständigen Instituten der UGM ein *Pre-Design* (PD) einschließlich einer *Bill of Quantity* als Leistungsverzeichnis ausgearbeitet. Nach der Übergabe der Dokumente im Juli 2012 erfolgte durch die indonesischen Partner die Entwicklung des *Detailed Engineering Design* (DED). Unter der Leitung des Dekanats der *Fakultas Teknik* (indonesisch: Fakultät der Ingenieurwissenschaften) waren die Abteilungen *Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan* (indonesisch: Bauingenieur- und Umweltwissenschaften), *Jurusan Teknik Mesin dan Industri* (indonesisch: Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen) und *Jurusan Teknik Elektro* (indonesisch: Elektrotechnik) sowie eine Forschungsgruppe aus dem Bereich des Holzingenieurbau beteiligt. Durch die kontinuierliche Zusammenarbeit konnte von Beginn an ein umfassender Wissenstransfer für die Mitarbeiter dieser Fachbereiche geleistet werden.

Zur Visualisierung der Inhalte des PD wurde ein vollständiges 3D-CAD-Modell der Förderanlage ausgearbeitet (siehe Abbildung 6.5). Weiterhin enthielt diese Entwurfsplanung umfassende Angaben in Bezug auf die Dimensionen der Bauwerke, des Rohrsystems und der erforderlichen hydraulischen Komponenten (z.B. Einlaufrechen, Revisionschutz, usw.) sowie Beschreibungen der Baustoffmengen.

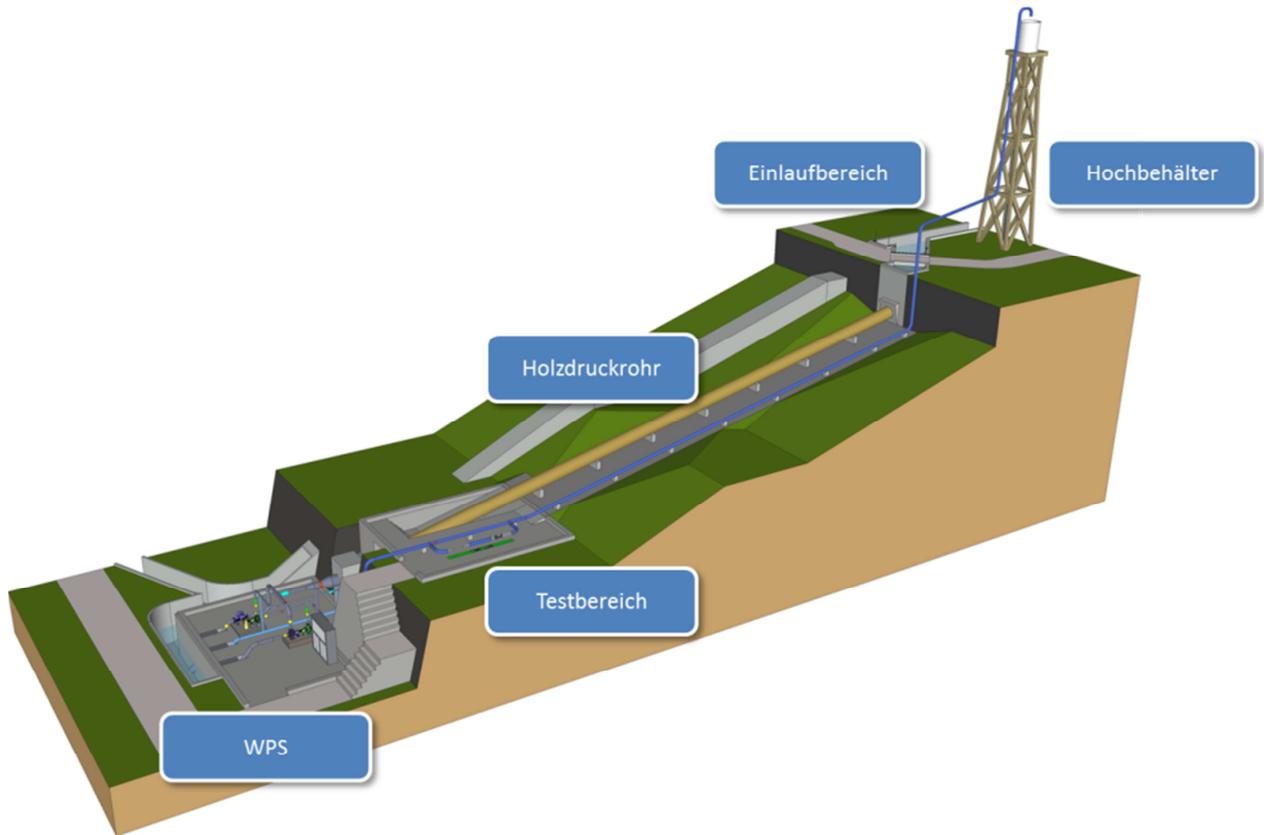


Abbildung 6.5: 3D-CAD-Modell der Demonstrationsanlage an der UGM, Yogyakarta, mit Kennzeichnung der maßgeblichen Anlagenbestandteile, verändert nach Banfi (2012)

Um einen breitgefächerten Wissensaustausch zu gewährleisten, erfolgte die Ausarbeitung des DED auf Basis des PD in enger Abstimmung zwischen indonesischen und deutschen Partnern. Insbesondere im Hinblick auf die Realisierung des Holzdruckrohres konnte hierbei ein umfassender zweidimensionaler Wissenstransfer geleistet werden. So wurde zum einen von deutscher Seite das *Knowhow* in Bezug auf die Bauausführung bereitgestellt, wobei Schwerpunkte auf geeigneten Fertigungsprozessen für die Holzdauben und Spannrings sowie den Montageprozess gelegt wurden. Ein zentraler Aspekt bei der Montage, den es zur Vermeidung von Leckagen zu berücksichtigen galt, war die sorgfältige Ausführung der Verbindung zwischen dem Holzrohr und metallischen Anschlussstücken. Zum anderen war die Auswahl eines Holzwerkstoffes für das Druckrohr insbesondere durch Kenntnisse der indonesischen Partner in Bezug auf Resistenz gegen Termitenbefall, Dauerhaftigkeit bei UV-Einstrahlung usw. geprägt, da für den Bau des Druckrohres der Einsatz lokal verfügbarer Hölzer vorgesehen war.

Nachfolgend wurde das erarbeitete DED unter steter Begleitung der deutschen Verbundpartner umgesetzt. Hierbei konzentrierte sich die Unterstützung insbesondere auf die Vermittlung von Erfahrungswerten, die bei der Implementierung der Anlage *Bribin* gewonnen wurden. Dies betraf zum einen die Installation der Fördermodule und deren Anschlussbauteile. Hierbei galt es für einen spannungsfreien Einbau Sorge zu tragen, da im Falle einer unzulässig hohen Stützenlast die Ausrichtung der Maschinen beeinflusst werden kann. Fehlausrichtungen können letztlich zu erheblicher Mehrbelastung von Kupplungen und Maschinenlagern führen (siehe Kapitel 4.10). Zum anderen wurden Kompensatoren zur Schwingungsdämpfung und Lastentkopplung in die Saug- und Druckrohre eingebaut, wodurch der spannungsfreie Verbau weiter begünstigt wird.

6.1.3 Messsystem für betriebsbegleitendes *Monitoring*

Weiterhin kamen bei der Entwicklung eines *Monitoring*-Systems die Erfahrungen aus *Bribin* zur Anwendung, mithilfe dessen die maßgebenden Betriebsparameter kontinuierlich im Betrieb überwacht und auf einem zentralen Schaltschrank angezeigt werden sollen. Zur Unterstützung des *Capacity Development* erfolgte die Gestaltung des Schaltschranks in Zusammenarbeit mit einem indonesischen Designer (siehe Abbildung 6.6). Mithilfe dieser grafischen Aufarbeitung konnten die wesentlichen Anlagenfunktionen bzw. deren Nutzen anschaulich dargestellt werden.



Abbildung 6.6: Deckplatte des Schaltschranks des *Monitoring*-Systems (links), gestaltet durch einen indonesischen Designer, Nutzung des Messsystems im Rahmen studentischer Praktika (rechts)

Anhand Abbildung 6.7 werden nachfolgend die wesentlichen Komponenten des Messsystems umrissen: Zur Bestimmung des PAT-Schluckvermögens (1) sowie der Fördermenge der Pumpen (2) wurden zwei induktive Durchflussmessgeräte installiert. Diese befinden sich in der gemeinsamen PAT-Zuleitung (DN150) sowie in der Steigleitung der Förderpumpen (DN80). Somit lassen sich im Einzelbetrieb die Volumenströme eindeutig zuordnen. Im Parallelbetrieb können Aussagen über die gemeinsamen Durchflussmengen durch beide PAT bzw. Förderpumpen getroffen werden.

Beide Volumenströme können durch Variation des Oberwasserstandes im Einlaufbecken verändert werden. Hier kann die Stauhöhe durch Einsetzen bzw. Entfernen von Wehrbalken in ein Überfallwehr eingestellt werden. Um die jeweiligen Volumenströme einer bestimmten Fallhöhe zuordnen zu können, ist nach dem Anschluss der Holzdruckleitung zur Rohrleitung im Krafthaus eine Druckmesssonde (3) installiert.

Bei Veränderung der Fallhöhe wird somit der Betriebspunkt beider Maschinen verschoben, wodurch sich auch eine Änderung der Drehzahlen ergibt. Diese wird mittels induktiver Sensoren in Kombination mit einem Flügelrad als Impulsgeber überwacht, um Aufschluss über den Betriebspunkt beider Strömungsmaschinen zu erhalten. Die Drehzahl eines Fördermoduls wird mit einer einzelnen Messvorrichtung auf Seiten der PAT erfasst. Bei Fördermodul 1 kann die Drehzahl der gekoppelten Pumpe unter Berücksichtigung der feststehenden Getriebeübersetzung von 1:1,5 umgerechnet werden. Da beim zweiten Modul PAT und Förderpumpe direkt gekoppelt sind und daher mit synchroner Drehzahl arbeiten, ist hier ein Drehzahlmesser ausreichend.

Die Energieversorgung des Messsystems erfolgt analog zum *Monitoring*-System in *Bribin* über eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher, wodurch auch an der Demonstrationsanlage an der UGM ein geeignetes Beispiel für eine Messeinrichtung im Inselbetrieb vorgestellt werden konnte.

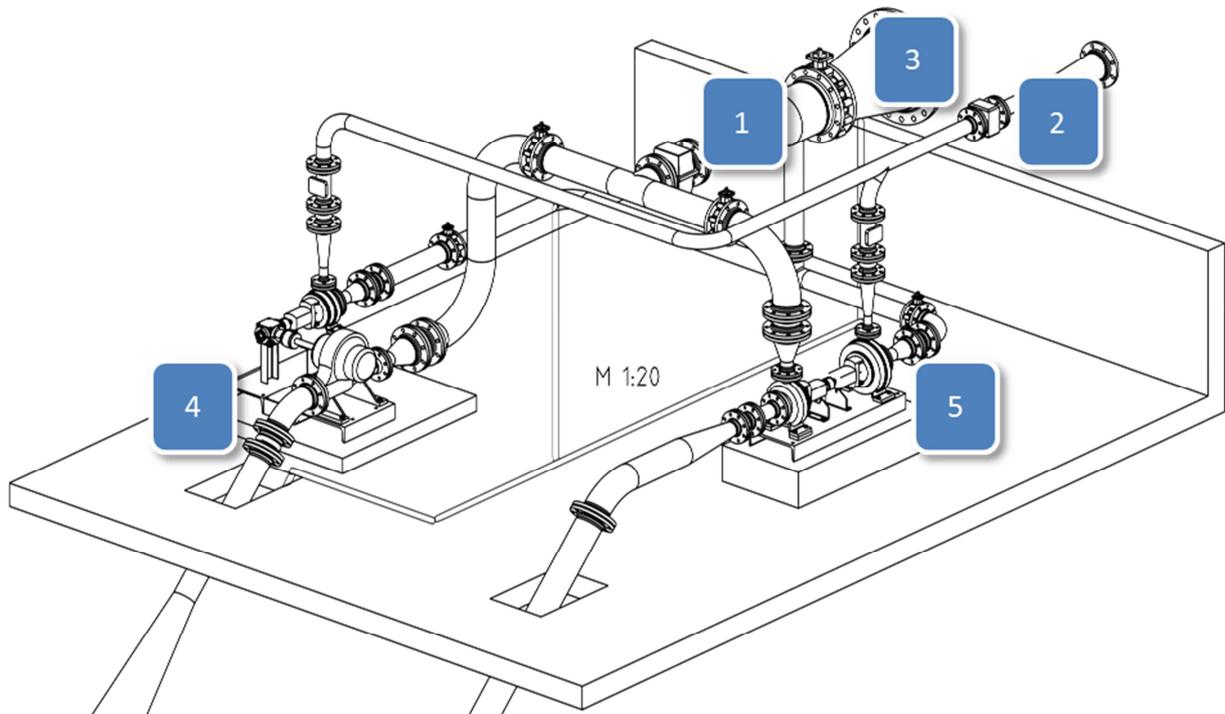


Abbildung 6.7: Kennzeichnung der maßgebenden Komponenten des Messsystems an der Demonstrationsanlage der UGM: Induktive Durchflussmesser in der PAT-Zuleitung (1) und Förderleitung (2), Druckaufnehmer in der Falleitung (3) und induktive Drehzahlmesser an Modul 1 (4) und 2 (5)

6.1.4 Einsatzbereiche

Die Schlüsselemente der Demonstrationsanlage an der Universität *Gadjah Mada, Yogyakarta*, sind durch die Anwendung einer Holzdruckleitung in Kombination mit einem WPS definiert. Erstgenannte Technologie eignet sich insbesondere für schwer zugängliche Standorte, da das Rohr im Wesentlichen aus einzelnen, leicht zu transportierende Dauben und Stahlspannringen besteht und somit eine Montage vor Ort möglich ist. Letztgenannte Technologie besteht durch den Betrieb mittels regenerativer Wasserkraft, wobei invers betriebene Kreiselpumpen statt konventioneller Wasserturbinen eingesetzt werden. Aufgrund der in Kapitel 3.4 beschriebenen Eigenschaften von „Pumpen als Turbinen“ (PAT) zeichnet sich das implementierte Förderkonzept durch geringe Komplexität sowie hohe Robustheit aus.

Nachdem die Demonstrationsanlage Anfang 2014 an das Dekanat der *Fakultas Teknik* der Universität *Gadjah Mada* (UGM) offiziell übergeben wurde, soll sie künftig im Wesentlichen für drei übergeordneten Ziele eingesetzt werden: (1) Als Feldlabor in der Lehre, bspw. im Rahmen studentischer Praktika, (2) als Forschungsobjekt für lokale Wissenschaftler sowie (3) als Anschauungsobjekt, um externen *Stakeholdern* (Mitarbeiter aus Unternehmen und Behörden sowie Privatpersonen) aus verschiedenen Sektoren (siehe Kapitel 6.1.1) die eingesetzten Technologien näherbringen zu können.

- **(1) Lehrobjekt:** Seit dem Wintersemester 2014/2015 wird die Anlage im Rahmen von Pflichtkursen genutzt und dabei durch Masterstudenten mit der Vertiefungsrichtung „Wasserkraft“ betrieben. Künftig sollen diese Art von Kursen auch für Studenten aus Bachelorstudiengängen und der UGM-eigenen Berufsfachschule angeboten werden.

- **(2) Forschungsobjekt:** Forschungsschwerpunkte ergeben sich hinsichtlich technischer Analysen des Fördersystems sowie der Holzrohrleitung während des Betriebs. Hierbei können Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf die technische Funktion sowie auf den pädagogischen Nutzen ausgearbeitet und umgesetzt werden. Weiterhin können im Rahmen von Feldstudien potentielle Standorte zur Multiplikation des Konzeptes identifiziert und eingehend auf ihre Eignung hin untersucht werden. Mithilfe dieser Standortbewertung kann eine unmittelbare Initiierung von Multiplikationsvorhaben in Bedarfsregionen Indonesiens bzw. auch über die Landesgrenzen hinaus erfolgen.
- **(3) Anschauungsobjekt:** Seit der Fertigstellung der Anlage wird diese von Seiten des Dekanats sowie der angeschlossenen Fachbereiche als Anschauungsobjekt für Besuchergruppen von anderen Hochschulen Indonesiens sowie von Unternehmen und Behörden eingesetzt. Auf diese Weise werden die eingesetzten Technologien einer Vielzahl potentieller Multiplikatoren zugänglich gemacht.

6.2 Pilotanlagen unter extremen naturräumlichen Bedingungen

Das zweite Multiplikationskonzept, welches im Rahmen des von Seiten des BMBF geförderten KaWaTech-Verbundvorhabens im Norden Vietnams umgesetzt wird (Stand August 2015), rückt das Ausloten des Anwendungspotentials eines WPS in den Fokus. Hierbei soll eine Pilotanlage einem eingehenden Langzeit-Praxistest unter hoher mechanischer Belastung unterzogen werden. Die Belastung ergibt sich durch die extremen topografischen Bedingungen in der Modellregion (Fall- und Förderhöhen von mehreren hundert Metern) sowie durch erhöhte Feststoffbeladung (eingetragene Menge an Feststoffen) aufgrund der Wasserentnahme aus einem natürlichen Gewässer (siehe Kapitel 5.4.2). Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sollen die Wissensbasis aus den Vorgängerprojekten deutlich erweitern und somit dazu beitragen, dass Multiplikationspotential von WPS weiter zu erhöhen. Die nachfolgende Beschreibung der Modellregion sowie der Zielsetzung des Vorhabens entstammt mehrheitlich dem unveröffentlichten Vollartrag zum KaWaTech-Verbundvorhaben.

6.2.1 Beschreibung der Modellregion *Dong Van*

Für das Vorhaben dient das *Dong Van Karst Plateau* im Norden Vietnams als Modellregion. Dieses Gebiet, welches sich über vier Distrikte der Provinz *Hà Giang* erstreckt, besteht zu ca. 50 % aus Kalkgestein. Die Topographie ist stark zergliedert und geprägt von Karsthügeln mit tiefen Tälern und Schluchten. Bei Geländehöhen von bis zu 1.700 m liegt ein erheblicher Teil der besiedelten Gebiete höher als 900 m (hierzu gehören bspw. die Distrikthauptstädte *Dong Van* und *Meo Vac*). Oberflächengewässer der Region befinden sich im Bereich von 200 m bis 400 m.

In der Region konzentriert sich der jährliche Niederschlag i.d.R. auf drei bis vier Sommermonate. Aufgrund der Eigenschaften von Karstlandschaften (siehe Kapitel 2.3.3 und 2.6.5.3) gibt es nur geringen dauerhaften Oberflächenabfluss. Natürliche Oberflächenspeicher fehlen gänzlich, ausgenommen in Regionen mit andersartigem Untergrund wie bspw. Ton- oder Sandstein. Durch die unterschiedliche Geologie verschwinden Flüsse stellenweise durch Schlucklöcher im Untergrund und treten mit großen Abflussschwankungen an unterschiedlichen Quellen wieder zutage. Das Wasser legt aufgrund der Topographie teils große Höhenunterschiede zurück, wobei Verbindungen zwischen Flüssen, Höhlen und Quellen sowie die Rückhaltewirkung des Aquifers usw. bislang weitestgehend unbekannt sind. (Van et al., 2004)

6.2 Pilotanlagen unter extremen naturräumlichen Bedingungen

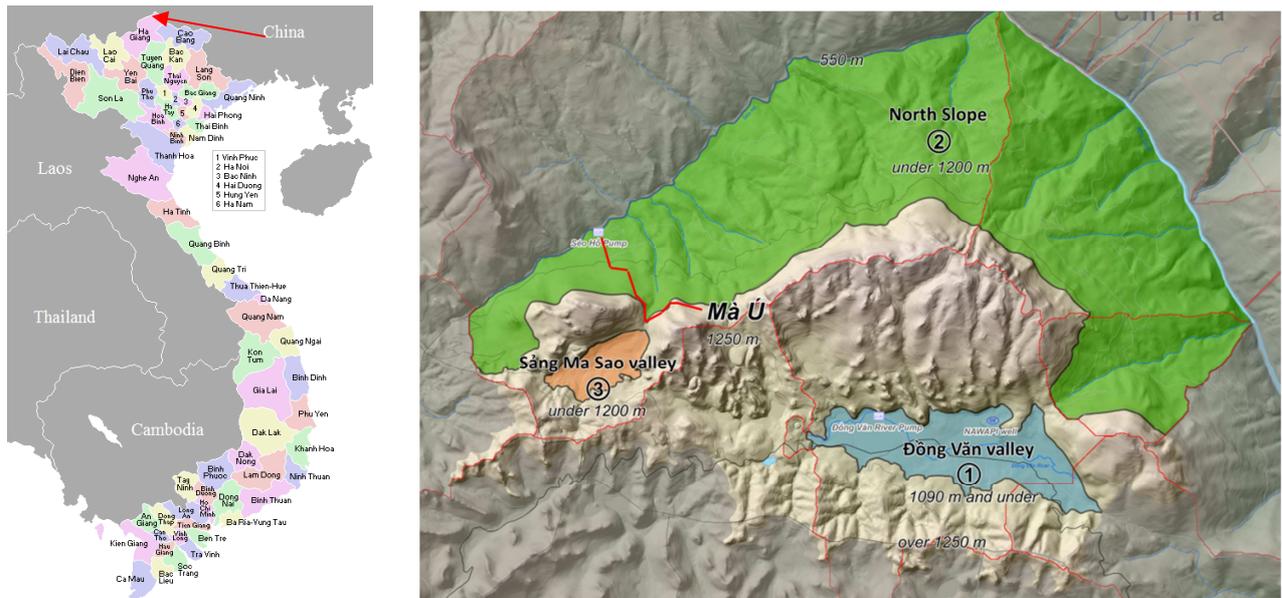


Abbildung 6.8: Markierung der nördlichsten Provinz Vietnams, Hà Giang³⁷ (links), Darstellung der Zonen innerhalb des Distrikts Dong Van³⁸ (in Hà Giang gelegen), deren künftige Versorgung mittels WPS von Seiten des KaWaTech-Verbundes geplant ist (siehe Kapitel 6.2.3) (rechts)

Gängigste Einkommensquelle der mehrheitlich in weitverteilten Siedlungen lebenden Menschen ist die Subsistenzwirtschaft, urbane Gebiete sind fast ausschließlich auf die Distrikthauptstädte begrenzt. Den Charakteristika von Karstlandschaften entsprechend ist die Wasserversorgung sehr limitiert und mit großem Aufwand verbunden. Wenngleich in den Distrikthauptstädten z.T. zentrale Verteilungssysteme installiert wurden, so erfolgt die Wasserversorgung kleinerer Siedlungen mehrheitlich dezentral bzw. individuell. (Klingel et al., 2011)

Die individuelle Versorgung erfolgt durch Sammeln von Oberflächenabflüssen und Quellwasser in privaten oder öffentlichen Einrichtungen, durch direkte Entnahme aus Quellen oder mittels Tanklastwagen. Einschränkungen ergeben sich vornehmlich durch große Entfernungen zwischen Quellen und Siedlungen, Kosten für privat organisierte Versorgung, jahreszeitlich bedingten Wassermangel (betrifft insbesondere die sechsmonatige Trockenzeit), schlechte Wasserqualität und ungleiche Verteilung. Nachdem das *Dong Van Karst Plateau* 2010 als Mitglied in das UNESCO Global Geopark Network (Gebiete mit landschaftlichen oder geologischen Besonderheiten können die Aufnahme beantragen) aufgenommen wurde ist zu erwarten, dass durch zunehmende Touristenzahlen die regionale Wasserversorgung weiter erschwert wird.

6.2.2 Zielsetzung des F&E-Verbundes

Aufgrund der extremen Topographie der Region existieren im Inneren der Karsthöhlensysteme sowie an der Oberfläche große Wasserkraftpotentiale. Sowohl für unter- als auch für oberirdische Standorte sollen daher zur Erschließung der jeweiligen Potentiale zwei Förderkonzepte ausgearbeitet werden. Beide Konzepte basieren auf den zuvor in Indonesien erprobten wasserkraftbetriebenen Pumpsystemen (WPS) und zeichnen sich daher durch hohe Robustheit, Flexibilität und Übertragbarkeit aus. Die Konzepte lassen sich wie folgt beschreiben:

³⁷ <http://de.academic.ru/pictures/dewiki/86/VietnameseProvincesMap.png> (16.12.2015)

³⁸ Kartographie des Instituts für Umwelttechnik + Ökologie im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum

- **Konzept I:** In der Region *Dong Van* werden oberflächige Wasserkraftpotentiale bereits teilweise durch konventionelle Kleinwasserkraftanlagen genutzt. Da die Wirkungsgrade herkömmlicher Turbinen bei geringen Abflüssen jedoch deutlich zurückgehen, können Restwassermengen insbesondere in der Trockenzeit i.d.R. nicht wirtschaftlich turbinert werden und verbleiben somit ungenutzt. Die Gewährleistung der ganzjährigen Betriebsfähigkeit dieser Anlagen ist aufgrund der für die Region typischen hohen Abflussvariabilität daher häufig nicht möglich. Demzufolge ist ohne eine Erweiterung durch eine Restwasserturbine im unteren Leistungsbereich eine zeitweise Abschaltung der Wasserkraftanlagen unumgänglich.

Vor diesem Hintergrund soll nun erstmalig ein WPS unter Hochdruckbedingungen eingesetzt werden. Für die bauliche Umsetzung wurde anhand von Voruntersuchungen die im Nordwesten der Distrikthauptstadt *Dong Van* gelegene Wasserkraftanlage *Seo Ho* ausgewählt (siehe Abbildung 6.8). Die Hochdruckbedingungen ergeben sich durch Fall- und Förderhöhen im Bereich von 20 bar bzw. 70 bar. Weiterhin wird mit der Anbindung an eine bestehende Wasserkraftanlage Neuland betreten. Neben dem hydraulischen Anschluss an die wasserbauliche Infrastruktur stehen hierbei insbesondere betriebliche Aspekte im Fokus. So soll es den Betreibern ermöglicht werden, abfluss- und bedarfsabhängig zwischen Stromerzeugung und Wasserförderung zu wählen.

Innerhalb des KaWaTech-Vorhabens sind die vollständige Ausarbeitung des Konzeptes sowie dessen pilothafte Implementierung und anschließende Validierung vorgesehen. Künftig soll die Anlage auch für Demonstrationszwecke zur Verfügung stehen.

- **Konzept II:** Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit wurden in der Modellregion (wie auch in vielen weiteren Karstgebieten weltweit) die unterirdischen Potentiale bislang noch nicht erschlossen. Konzept II sieht daher die Nutzung von Wasserkraftpotentialen an schwer zugänglichen Standorten (bspw. in Karsthöhlensystemen oder auch in tiefen oberirdischen Schluchten) und unter extremen naturräumlichen Rahmenbedingungen (Auftreten extremer hydrodynamischer Kräfte und morphodynamischer Prozesse, große Abflussschwankungen des Gewässersystems) vor. Hierzu soll die Kapselung des WPS mittels Betonhülle erfolgen, um so das System bestmöglich vor äußeren Einflüssen zu schützen. Aufgrund des dezentralen Einsatzes mit eingeschränkter Zugänglichkeit ergeben sich hohe Anforderungen an die Maschinenteknik, da deren Betrieb über große Teile des Jahres völlig autark und ohne die Möglichkeit zur Wartung erfolgen soll.

In der ersten Projektphase sind zunächst die Ausarbeitung eines Baukastensystems für gekapselte WPS (bzgl. Maschinenteknik und Schutzhülle) sowie die Identifizierung potentieller Standorte in der Modellregion in enger Zusammenarbeit u.a. mit der KSB AG vorgesehen. Sofern die Eignung eines konkreten Standortes nachgewiesen werden kann, soll in der anschließenden zweiten Projektphase ein Prototyp entwickelt, auf dem Prüffeld der KSB AG getestet und vor Ort implementiert und validiert werden.

Ergänzt wird das Vorhaben durch die Entwicklung und exemplarische Umsetzung angepasster Konzepte für die Wasserverteilung. Hierbei werden unterschiedliche Ansätze für zentrale, semi-zentrale und dezentrale Anwendungen betrachtet. Die Entscheidung, welcher Ansatz an einem bestimmten Standort bzw. in einer bestimmten Region letztlich Anwendung findet, soll anhand der verfügbaren Wasserressourcen, der existierenden Verteilinfrastrukturen und des aktuellen und künftigen Wasserbedarfs getroffen werden.

Als Grundlage zur Bearbeitung der o.g. Forschungsaspekte sollen die Ergebnisse von Feldstudien im Untersuchungsgebiet dienen. Hierbei sollen neben den naturräumlichen auch die soziologischen Rahmenbedingungen eingehend betrachtet werden. In diesem Zusammenhang ist die Umsetzung vielfältiger *Capacity-Development*-Maßnahmen vorgesehen, welche auf wissenschaftlicher (Austauschprogramme und *Summer Schools*) und Nutzerebene (Schulungen und Sensibilisierungskampagnen für das Betriebspersonal sowie die lokale Bevölkerung) den Wissens- und Technologietransfer sowie den Wasserressourcenschutz sicherstellen sollen.

6.2.3 Konzept I: Pilothafte Umsetzung an der Wasserkraftanlage Seo Ho

Den o.s. Ausführungen zufolge soll Konzept I erstmalig an einer am *Seo Ho* Fluss gelegenen Wasserkraftanlage implementiert werden (siehe Abbildung 6.8). Dieser Standort wurde bereits im Rahmen BMBF-geförderter Vorstudien des KIT (Anbahnungsreise 2010, Definitionsphase 2011) identifiziert.

Das Ausleitungskraftwerk *Seo Ho* wurde in den 1990er Jahren zur Stromerzeugung errichtet und verfügt über zwei Pelton-turbinen mit einer maximalen Leistung von insgesamt 500 kW. Ein Schema des Anlagenaufbaus ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Seit ihrer Fertigstellung wird sie vom halbstaatlichen Energieversorger *Electricity Vietnam* (EVN) betrieben. Felduntersuchungen des KIT zufolge wurden selbst während der Regenzeit trotz ausreichender Abflussmengen zeitweise lediglich 200 kW erzeugt, was einer Auslastung von gerade einmal 40 % entspricht. Als Ursachen konnten vornehmlich technische und personelle Fehler bei der Anlagensteuerung sowie unzureichende Wartung und Instandhaltung des Gesamtsystems ausgemacht werden.

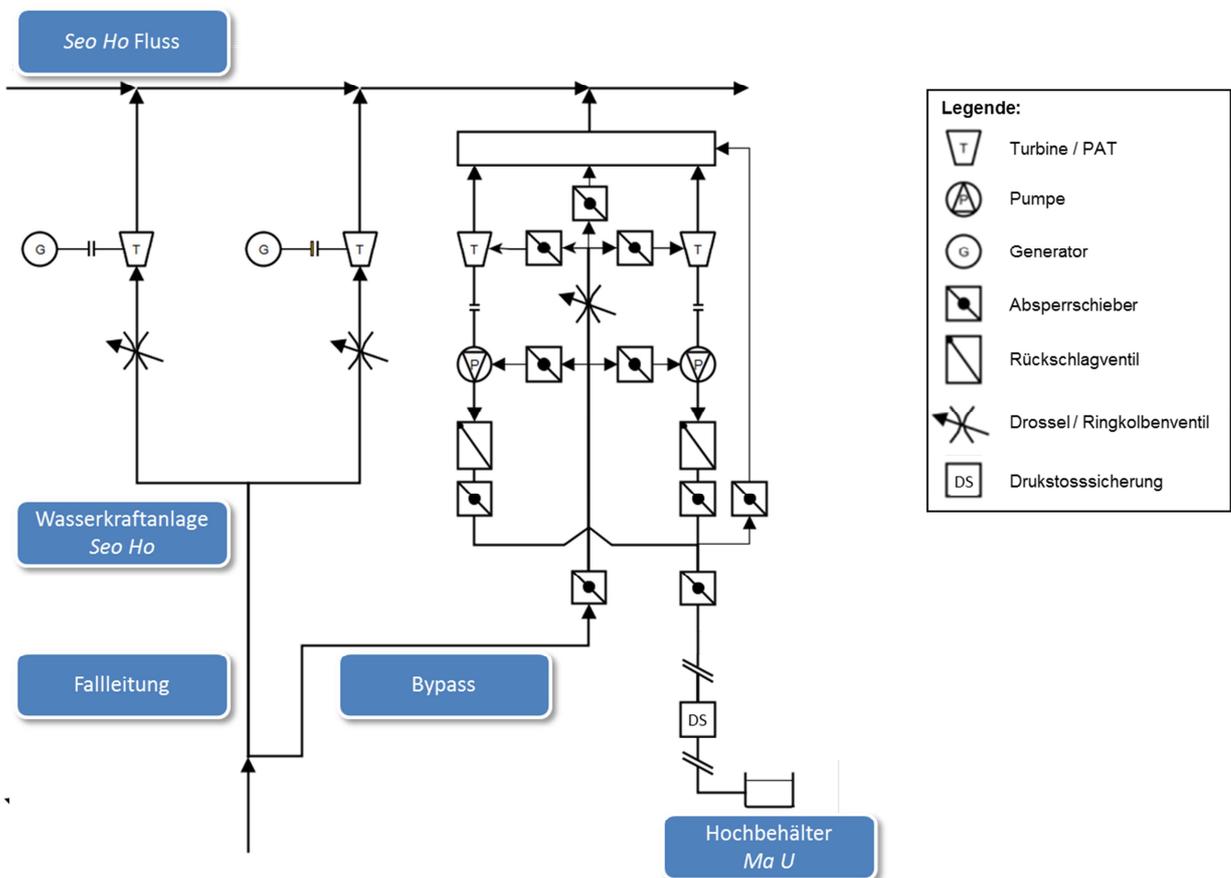


Abbildung 6.9: R&I-Schema der bestehenden Wasserkraftanlage *Seo Ho* sowie der geplanten Erweiterung durch ein Wasserfördersystem in Anlehnung an Konzept I

Anhand von umfassenden Datenerhebungen seitens des KIT konnte gezeigt werden, dass auch während der Trockenzeit ein Mindestabfluss des *Seo Ho* von über 100 l s^{-1} angenommen werden kann; eine Unterschreitung wird lediglich bei extremen Wetterlagen als möglich erachtet. Zwar weisen Peltonturbinen gegenüber anderen Turbinen ein vergleichsweise gutes Teillastverhalten auf. Jedoch geht im Falle der *Seo Ho* Anlage die o.g. Abflussmenge mit einem sehr geringen Wirkungsgrad der Peltonturbinen (einschließlich des Generators) von weniger als 65 % einher. Laut Aussagen des Betreibers EVN ist daher eine zeitweise Abschaltung der Anlage während der jährlichen Trockenzeit häufig nicht zu vermeiden, wenngleich eben dieser Zeitraum durch erheblichen Wasserbedarf insbesondere in den höher gelegenen Siedlungen gekennzeichnet ist.

Vor diesem Hintergrund wurde in Kooperation mit der KSB AG ein WPS unter Berücksichtigung der gegebenen hydraulischen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen entwickelt, welches gemäß Konzept I als Erweiterung der bestehenden Anlage *Seo Ho* implementiert werden soll (siehe Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10). Dieses WPS ermöglicht eine hocheffiziente Nutzung geringer Abflüsse durch den Einsatz zweier baugleicher Fördermodule, die nach Bedarf bzw. je nach Abfluss manuell zu- oder abgeschaltet werden können. Das durch einen umfassenden Auswahlprozess entwickelte Einzelmodul besteht aus einer zweistufigen Gliederpumpe Multitec A 65/2 6.1 als PAT sowie aus einer zwölfstufigen Multitec 50/12 4.1 als Förderpumpe (die Multitec-Serie wurde bereits in *Bribin* eingesetzt). Aufgrund der Erfahrungen aus dem Vorgängervorhaben in Indonesien wurde eine Lösung ohne Getriebeübersetzung angestrebt.

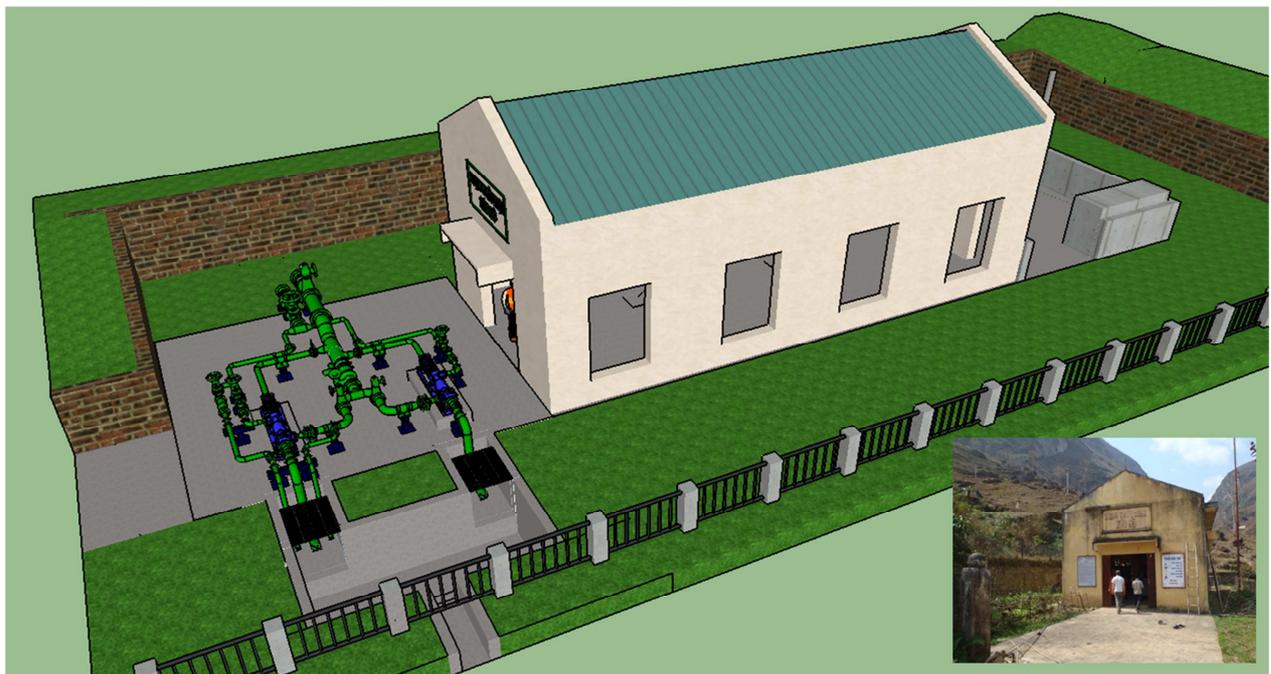


Abbildung 6.10: 3D-CAD-Modell des WPS als Erweiterung der Wasserkraftanlage *Seo Ho*, rechts unten eine verkleinerte Darstellung der realen Anlage

Da die Wasserentnahme aus einem natürlichen Gewässer erfolgt, wurden aufgrund der zu erwartenden, zeitweise (insbesondere nach Niederschlagsereignissen) hohen Feststoffbeladung auch andere Maschinenkombinationen untersucht. So wurde zwischenzeitlich eine Kombination von zwei Maschinen der Baureihe Multitec (PAT: 100/5 8.1; Förderpumpe: 65/16 5.1) favorisiert, da die höheren Stufenzahlen zu geringeren Betriebsdrehzahlen n bzw. Umfangsgeschwindigkeit der Laufräder v_U führen (n : 2.100 min^{-1} statt 2.700 min^{-1} ; v_U : 27 m s^{-1} statt 30 m s^{-1}). Dies hat in Bezug auf den betriebsbedingten Verschleiß substantielle Vorteile, da dieser maßgeblich durch

die Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt beeinflusst wird. Auf Seiten der Förderpumpe musste jedoch die für diese Baureihe maximal zulässige Stufenanzahl gewählt werden, wonach es kaum Spielraum zur technischen Anpassung im Falle einer veränderten Hydraulik gegeben hätte. Auch hätten für diese Maschinenkombinationen Sonderwerkstoffe u.a. für die Laufräder eingesetzt werden müssen, wodurch sich letztlich die Anschaffungskosten gegenüber der zuvor genannten Variante auf das Dreifache erhöht hätten. Im Hinblick auf potentielle Multiplikationsvorhaben wurde daher die schneller drehende, jedoch kostengünstigere und technisch flexiblere Maschinenkombination ausgewählt.

Von Seiten der KSB AG wurden in Bezug auf die zulässige Feststoffbeladung ein Grenzkorn von 0,2 mm sowie eine Schwebstoffkonzentration von 20 mg l⁻¹ angegeben. Um eine unzulässig hohe Belastung der Maschinen im Langzeitbetrieb weitgehend ausschließen zu können, soll zum einen zur Erhöhung der Absetzkapazität der bestehende Sandfang sowie das Einlaufbecken umgestaltet werden. Erreicht werden soll dies durch Optimierungsmaßnahmen wie bspw. dem Rückbau einer Einengung im Sandfang und einer Verlängerung des Einlaufbeckens, wodurch der Turbulenzeintrag reduziert und die Strömung vergleichmäßigt wird. Die Maßnahmen führen letztlich dazu, dass ein kleineres Grenzkorn abgesetzt werden kann. Zum anderen ist geplant ein Mess-/Alarmsystem einzusetzen, welches mit einer Trübungs- oder Leitfähigkeitsmesssonde ausgestattet wird und bei einer Überschreitung der zulässigen Schwebstoffkonzentration das Betriebspersonal auf die Abschaltung der Maschinen hinweist.

Nach Abschluss des Auswahl- und Entwicklungsprozesses wurden die Maschinen bzw. die Fördermodule auf dem Forschungsprüffeld der KSB AG eingehenden Tests unterzogen. Alle Maschinen wurden bei unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen (Variation von Fall- bzw. Förderhöhe) im Pumpen- sowie die künftigen PAT auch im Turbinenbetrieb geprüft, wobei die in Tabelle 6.2 dargestellten Kenngrößen für den jeweiligen Bestpunkt ermittelt wurden. Diese entsprechen vollständig den zuvor theoretisch berechneten Betriebskenngrößen.

Diesen Kennwerten zufolge liegt der Bemessungsabfluss eines Einzelmoduls bei 54 l s⁻¹ und somit deutlich unter der angenommenen Mindestabflussmenge, wodurch die ganzjährige Betriebsfähigkeit gewährleistet wäre. In Bezug auf die Mindestabflussmenge sollte zumeist auch der Parallelbetrieb möglich sein (Ausbaudurchfluss ca. 105 l s⁻¹), sofern nicht die Stromerzeugung durch die Altanlage höher priorisiert wird. Um die betriebliche Flexibilität weiter zu erhöhen, wurde zusätzlich eine Drosselarmatur am PAT-Zulauf eingeplant (siehe Abbildung 6.9). Dies soll im Betrieb die Feinabstimmung von Anlagenschluckvermögen und verfügbarer Wassermenge ermöglichen. Somit kann das Fördersystem Abflüsse im Bereich von ca. 35 l s⁻¹ ($Q_P \approx 3 \text{ l s}^{-1}$) bis 105 l s⁻¹ ($Q_P \approx 21 \text{ l s}^{-1}$) verarbeiten.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Prüffeldtests der KSB AG zu Konzept I³⁹

	PAT (Multitec 65/2 6.1)	Pumpe (Multitec 50/12 4.1)	Gesamtmodul
Fallhöhe [m]	195	-	195
Förderhöhe [m]	-	360	360
Durchfluss [m³ s⁻¹]	42,7	11,5	54,0
Prüfdrehzahl [min⁻¹]	3.020	2.700	2.700
Wirkungsgrad [-]	75,5	65,0	49,0 %

³⁹ Ergebnisse der Prüffeldtests durch die KSB AG zur Verfügung gestellt

Tabelle 6.2 zufolge ist beim Nennbetriebspunkt eines Einzelmoduls eine Förderrate von mehr als 11 l s^{-1} vorgesehen. Bei einem kontinuierlichen Anlagenbetrieb entspricht dies einer täglichen Fördermenge von ca. 950.000 Litern. Im Parallelbetrieb liegt die Förderrate im Bestpunkt bei ca. 21 l s^{-1} bzw. bei ca. 1.800.000 Litern pro Tag. Erhebungen des KaWaTech-Verbundes zufolge wohnen in den Gebieten, die dem künftigen Versorgungsgebiet zugerechnet werden, aktuell ca. 2.500 Menschen (Stand August 2015). Alleine der zeitweise Betrieb eines Einzelmoduls ermöglicht bereits die Deckung des Bedarfs der Einwohner. Da aus technischen Gründen der Dauerbetrieb des WPS favorisiert wird, ist zusätzlich die Versorgung der Distrikthauptstadt *Dong Van* vorgesehen. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Tourismus' in der Region und der somit erwarteten progressiven Verbrauchsentwicklung wird dieser Versorgung eine große Bedeutung beigemessen.

Generell bestehen auf Seiten der lokalen Partner hohe Erwartungen an die künftige Wasserversorgung. Allen voran bei der Provinzregierung *Hà Giang People Committee*, da sich diese bei der Umsetzung von Konzept I durch eine finanzielle Beteiligung und die Übernahme von Eigenleistungen einbringt. Um eine nachhaltige Investition sicherzustellen, wurde die bestehende Infrastruktur der Anlage *Seo Ho* im Hinblick auf ihre Restlebensdauer beurteilt sowie Maßnahmen zur Sanierung und Optimierung entwickelt (hierzu können u.a. die o.g. Optimierungsmaßnahmen an Sandfang und Einlaufbecken gezählt werden).

6.2.4 Konzept II: Planung der Umsetzung in der Karsthöhle *Sang Ma Sao*

Im Rahmen der ersten Projektphase wurde zunächst ein Baukastensystem für gekapselte WPS ausgearbeitet. Hierzu wurden in enger Kooperation mit der KSB AG Maschinen ausgewählt, welche sich für den Einsatz unter extremen naturräumlichen Bedingungen eignen. Neben der (1) Verarbeitung von Geringstabflüssen sah das Anforderungsprofil vor, dass die Maschinen (2) nass aufstellbar sein und (3) eine Vielzahl von Baugrößen erlauben müssen (bspw. durch veränderliche Stufenzahl), (4) feststoffbeladene Medien verarbeiten können und (5) möglichst wartungsarm sind. Diesen Vorgaben entsprechend wurden aus dem Produktkatalog der KSB AG die folgenden Baureihen ausgewählt: Amaline (Propellerpumpe), Amarex KRT und Amacan (Tauchmotorpumpen) sowie die UPA-Serie (Brunnenpumpe).

Im Hinblick auf die in der zweiten Projektphase geplante pilothafte Implementierung von Konzept II wurde die Modellregion durch den F&E-Verbund auf potentielle Standorte hin untersucht. Hierbei wurde die Karsthöhle *Sang Ma Sao* identifiziert, welche sich durch eine geeignete Topographie in Form einer nutzbaren Fallhöhe von ca. 40 m (Wasserfall) auszeichnet. Weiterhin wurde auf Basis punktueller Abflussmessungen angenommen, dass auch während der Trockenzeit zumeist ein Mindestabfluss von ca. 6 l s^{-1} bis 8 l s^{-1} gegeben ist.

Unter Berücksichtigung einer Förderhöhe⁴⁰ von 135 m sowie weiterer Annahmen⁴¹ konnten mithilfe eines Auslegungsprogramms (siehe Kapitel 5.4.3) geeignete Maschinenkombinationen für den Standort *Sang Ma Sao* identifiziert werden. Aufgrund der geringen Abflüsse basieren sämtliche Varianten auf Maschinen der UPA-Serie. Weiterhin führen ungünstige Verhältnisse von PAT-Schluckvermögen zu Fallhöhe sowie Fördermenge zu Förderhöhe dazu, dass die Maschinen mit hoher Stufenzahl ausgeführt werden müssen.

⁴⁰ Geodätische Höhendifferenz zwischen geplantem Anlagenstandort und dem Dorf *Khe Lia* als potentiellem Versorgungsziel, abzüglich des Vordrucks von 40 m, Vernachlässigung von Verlusthöhen

⁴¹ Maschinenwirkungsgrade: $\eta_T = \eta_P = 50 \%$; Wirkungsgrad Getriebe und Kupplungen: $\eta_{Komp.} = 90 \%$, maximale Fallhöhe: $H_T = 40 \text{ m}$; maximaler Ausbaudurchfluss: $Q_A = 6 \text{ l s}^{-1}$

So sieht die Maschinenkombination, welche rechnerisch die höchste Förderrate gewährleistet, eine PAT (UPA 150C 30) mit 20 Stufen sowie eine Förderpumpe (UPA 100C 2) mit 61 Stufen vor. Da bei der UPA-Serie die maximal zulässige Stufenzahl bei 62 liegt, werden durch die o.g. Baugrößen die Auslegungsgrenzen beinahe erreicht. Diese Maschinenkombination ermöglicht bei einem PAT-Schluckvermögen von $Q_T \approx 4,2 \text{ l s}^{-1}$ eine Fördermenge von $Q_P \approx 0,3 \text{ l s}^{-1}$. Da somit der Bemessungsdurchfluss des Moduls mit $Q_A \approx 4,5 \text{ l s}^{-1}$ deutlich unterhalb des angenommenen Mindestabflusses von 6 l s^{-1} liegt, sollte die dauerhafte Betriebsfähigkeit des WPS möglich sein. Aus technischer und betrieblicher Sicht bestehen bei dieser Modulvariante jedoch drei nicht zu vernachlässigende Schwachstellen. Nachfolgend werden diese Einschränkungen beschrieben und mögliche Lösungs- bzw. Anpassungsansätze aufgezeigt.

- **Schwachstelle:** Aufgrund unterschiedlicher Nenndrehzahlen kann ein Getriebeeinsatz bei der o.g. Modulvariante (Übersetzung $i = 1:1,41$) rechnerisch nicht vermieden werden. Wenngleich es Unterwassergetriebe gibt, die für einen derart anspruchsvollen Einsatz geeignet sein können (Modul muss nass aufstellbar sein usw.), so lehrt die Erfahrung aus der Pilotanlage *Bribin* den Verzicht auf ein Getriebe einer Lösung mit Drehzahlübersetzung vorzuziehen (siehe Kapitel 5.4.1).

Lösungsansatz: Da die für die UPA-Serie im Auslegungsprogramm hinterlegten Kennlinien auf Basis empirischer Ansätze rechnerisch ermittelt wurden, ist eine Abweichung der realen Kurven möglich. Daher ist es nicht auszuschließen, dass ein Modul, welches rechnerisch den Einsatz eines Getriebes erfordert, in Realität ohne Drehzahlübersetzung auskommt (ggf. durch Anpassung der Stufenzahl bei PAT und/oder Förderpumpe). Überprüft werden kann dies mittels praktischer Versuche auf einem Prüffeld. Am besten geeignet ist hierbei die Variante, welche sich rechnerisch durch die geringste Übersetzung (minimaler Drehzahlunterschied zwischen PAT und Förderpumpe) auszeichnet, da hier der Aufwand zur Anpassungen der Maschine(n) am geringsten ausfällt.

- **Schwachstelle:** Bei Maschinen der UPA-Serie erfolgt die Aufnahme von Axialkräften durch die Axiallager des für gewöhnlich angeschlossenen Elektromotors. Aufgrund des Einsatzes der Pumpen ohne Motor ist eine Sonderlösung erforderlich.

Lösungsansatz: Der Axial Schub von PAT und Förderpumpe ist entgegengesetzt gerichtet und kann durch die Integration eines einzelnen Axiallagers (zwischen den beiden Maschinen) abgetragen werden. Zur fachgerechten Auslegung des Axiallagers sind Kenntnisse in Bezug auf die zu erwartenden Axialkräfte erforderlich. Dieser Aspekt steht nur eingeschränkt im Einklang mit dem Ansatz, WPS möglichst auf Basis von Standardmaschinen auszulegen. Da jedoch kein weiterer potentieller Standort in der Modellregion identifiziert werden konnte und für den Standort *Sang Ma Sao* rechnerisch keine Lösung mit alternativem Maschinentyp gefunden wurde, ist eine weiterführende Betrachtung dieser Modulvariante geplant.

- **Schwachstelle:** Laut KSB AG sind für den Einsatz von UPA-Pumpen eine maximale Schwebstoffkonzentration von 50 mg l^{-1} sowie ein Grenzkorn von ca. 3 mm zulässig (letztere Angabe basiert lediglich auf praktischen Erfahrungen und ist kein offizieller Grenzwert). Potentielle Standorte sind jedoch durch extreme hydrodynamische Kräfte und morphodynamische Prozesse gekennzeichnet, wodurch Vorkehrungen zur Vermeidung einer höheren Feststoffbelastung getroffen werden müssen.

Lösungsansatz: Aufgrund des vergleichsweise kurzen Beobachtungszeitraums kann in der Höhle *Sang Ma Sao* eine Überstauung des künftigen Anlagenstandortes bzw. der Wasserfassung am Einlauf der Falleitung nicht zuverlässig ausgeschlossen werden. Ob zur Abscheidung größerer Partikel ein Sandfang oder andere technische Lösungen wie bspw. ein Hydrozyklon in das Gesamtanlagendesign integriert werden können, muss sorgfältig geprüft werden. Eine Reduktion des Schwebstoffgehalts ist jedoch generell kaum zu bewerkstelligen. Daher sollten die Standzeiten des Moduls möglichst gering gehalten werden, um das Absetzen der Schwebstoffe in den Maschinen sowie daraus resultierende technische Probleme beim erneuten Starten vermeiden zu können.

6.2.5 Einsatzbereiche

Beide im Rahmen des KaWaTech-Vorhabens entwickelte Förderkonzepte zeichnen sich durch hohes Anwendungspotential aus. So ist im Gegensatz zum Förderkonzept der Anlage *Bribin* eine Implementierung bei unterschiedlichsten geologischen Gegebenheiten möglich, da sowohl ein Konzept für oberflächigen Abfluss als auch für unterirdische Entwässerung zur Verfügung steht und ein partieller Einstau eines (Karst-) Fließgewässers nicht erforderlich ist. Da generell die hohe Robustheit von WPS zu geringen technischen und finanziellen Anforderungen an potentielle Betreiber führt, ist die Anwendung von Konzept I und II sowohl in Schwellen- und Entwicklungsländern als auch in höher entwickelten Regionen grundsätzlich möglich.

Durch die bauliche Umsetzung an der *Seo Ho* Anlage (Konzept I) bzw. in der Höhle *Sang Ma Sao* (Konzept II) werden weiterhin Referenzanlagen geschaffen, welche einen umfassenden Gewinn an praktischen Erfahrungen ermöglichen. Da gleichzeitig auch der lokalen Bevölkerung eine Verbesserung der Wasserversorgung ermöglicht wird, werden zusätzliche Anreize zur Vervielfältigung bspw. in nahegelegenen Provinzen geschaffen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wasser ist die Grundlage allen Lebens, daher kommt der nachhaltigen Versorgung in ausreichender Menge und Qualität eine hohe Bedeutung zu. Weltweit leiden jedoch auch heute noch Millionen von Menschen unter physischer und/oder wirtschaftlicher Wasserknappheit, wobei die Folgen von Einschränkungen der (wirtschaftlichen) Entwicklung der betroffenen Regionen bis hin zu existenzbedrohenden Zuständen für die lokale Bevölkerung reichen (WWAP, 2012).

Physische Wasserknappheit kann durch die begrenzte Verfügbarkeit oder gar das Fehlen von Wasserressourcen infolge ungünstiger naturräumlicher Bedingungen beschrieben werden. Aufgrund überregionaler und/oder globaler Mechanismen wie (verstärkten) Klimaphänomenen und der Erderwärmung ist künftig vielerorts mit einer Verstärkung dieser Sachlage zu rechnen (IPCC, 2007). Dies hat letztlich die zunehmende Verschlechterung der Versorgungssituation in den betroffenen Regionen zur Folge.

In diesem Zusammenhang können Karstregionen als Beispiel für Landschaftsformen genannt werden, welche insbesondere aufgrund ihrer hydrogeologischen Eigenschaften häufig durch physische Wasserknappheit betroffen sind. Da diese Regionen mehr als 25 % der Weltbevölkerung beheimaten bzw. deren Wasserversorgung aus Karstgrundwasserleitern gewährleisten (Williams und Ford, 2006), wird die Brisanz der physischen Wasserknappheit sehr deutlich vor Augen geführt. So führen in den betroffenen Regionen hohe Infiltrationsraten des Karstgesteins mitunter zu gravierendem Wassermangel an der Oberfläche (Nestmann et al., 2012). Zugleich existieren teils enorme unterirdische Ressourcen, welche zur Verbesserung der lokalen Versorgungssituation erschlossen und bewirtschaftet werden können (Dittmann et al., 2011). Deren inhomogene Verteilung und tiefe Lage führt jedoch bereits bei der Exploration zu erheblichen Erschwernissen, wodurch selbst eine erfolgreiche Erschließung i.d.R. mit enormem technischem und finanziellem Aufwand einhergeht (Nestmann et al., 2012).

Wirtschaftliche Wasserknappheit ist hingegen primär die Folge anthropogener Prozesse und resultiert vornehmlich aus begrenztem wirtschaftlichem Potential, limitierter technologischer Innovationsfähigkeit, mangelhaften institutionellen Strukturen sowie Ressourcenverschwendung und falscher Bewirtschaftung.

Schwellen- und Entwicklungsländer leiden häufig unter beiden Formen der Wasserknappheit. Einerseits resultiert die physische Wasserknappheit aus der geografischen Lage dieser Länder in wasserarmen Regionen mit jährlich/saisonal stark schwankenden Niederschlagsmengen (gtz, 2009). Andererseits steht die dortige wirtschaftliche Wasserknappheit neben den o.g. Ursachen auch im Zusammenhang mit dem Fehlen adäquater Regel- und Normwerke sowie ungenügenden oder gänzlich fehlenden Daten als Planungsgrundlage (BMZ, 2006).

Vor diesem Hintergrund befasst sich das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bereits seit fast 20 Jahren mit der Entwicklung

angepasster Technologien für nachhaltiges Wasserressourcen-Management mit dem Schwerpunkt auf Bedarfsregionen in Schwellen- und Entwicklungsländern Südostasiens.

Den Rahmen für diese F&E-Aktivitäten boten insbesondere die seitens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten interdisziplinären Verbundvorhaben „Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer“ (Laufzeit 2002 bis 2008) und „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in *Gunung Kidul, Java, Indonesien*“ (Laufzeit 2008 bis 2014). Hierbei erfolgte u.a. die Entwicklung und pilothafte Implementierung einer unterirdischen Wasserförderanlage in der Karsthöhle *Gua Bribin* (indonesisch: Höhle *Bribin*) auf Basis einer eigens hierfür entwickelten hoch-anpassungsfähigen Fördertechnologie. Die Nachhaltigkeit dieser in enger Kooperation mit der KSB AG entwickelten Technologie ergibt sich aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht durch den wasserkraftbasierten Antrieb mittels rückwärtslaufender Kreiselpumpen („Pumpe als Turbine“, PAT). Diese werden zur Nutzung eines mittels Sperrwerk künstlich geschaffenen Wasserkraftpotentials eingesetzt und ermöglichen durch mechanische Kopplung mit Hochdruck-Förderpumpen eine partielle Förderung des Höhlenabflusses an die Oberfläche. (Nestmann et al., 2009)

Diese „wasserkraftbetriebenen Pumpsysteme“ (WPS) zeichnen sich durch hohe Robustheit und Effizienz sowie durch geringe Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten aus. Um das technologische Potential für einen Standort voll ausschöpfen zu können, ist eine sachgerechte Dimensionierung aller Maschinen und Komponenten unter Berücksichtigung der maßgebenden naturräumlichen, sozio-ökonomischen und -kulturellen Einflüsse erforderlich. Den Erfahrungen aus der Entwicklungs-, Umsetzungs- und Betriebsphase der Anlage *Bribin* zufolge kommt hierbei einem angemessenen Wissenstransfers für die künftigen Betreiber in allen Stadien der Technologieentwicklung und -implementierung eine entscheidende Bedeutung zu. Unter Berücksichtigung dieser Vorgabe wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein Lösungsansatz erarbeitet, um die zuvor beschriebenen WPS sowie unterschiedliche Förderkonzepte standortgerecht entwickeln und nachhaltig implementieren zu können.

Hierfür erfolgten im Rahmen der Dissertation umfassende technische und betriebliche Analysen der Pilotanlage *Bribin*, um anhand praktischer Erfahrungen eine Wissensgrundlage zur Ausarbeitung der Methodik zu schaffen. Grundsätzlich könnten Problemlösungsstrategien wie bspw. das SPALTEN-Verfahren (Saak, 2006) Anwendung finden, um selbst für höchst anspruchsvolle Rahmenbedingungen ein realisierbares Wasserförderkonzept auszuarbeiten. Dem stehen jedoch zwei zentrale Aspekte entgegen: Zum einen berücksichtigen derlei Verfahren das für den nachhaltigen Betrieb sowie für die Erschließung des Multiplikationspotentials der Technologie erforderliche *Capacity Development* i.d.R. nicht oder nur unzureichend. Zum anderen sind zur Anpassung und Anwendung dieser bewusst sehr allgemein gehaltenen Verfahren umfassende, jedoch häufig nicht vorhandene Methodenkenntnissen erforderlich.

Die Struktur der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Implementierungsmethodik sieht daher die umfassende Einbindung der Zielpersonen (sowohl Betriebs- als auch Führungspersonal) in den Entstehungsprozess der technischen Einrichtung sowie die Befähigung dieser Personen zur Bewältigung aller relevanten Betriebs- und Wartungsaufgaben vor. Um dabei den insbesondere bei Implementierungsvorhaben in Schwellen- und Entwicklungsländern nicht selten sehr anspruchsvollen Rahmenbedingungen bspw. in Form von limitierten Planungsdaten Rechnung zu tragen, schließt der Ansatz eine Optimierungsmethode in Anlehnung an das international anerkannte Instrument des „Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses“ (KVP, englisch: *Continuous Improvement Process*, CIP) ein (Kostka

und Kostka, 2011). Dieser in vielen Industriezweigen gängige Prozess beruht auf dem japanischen Konzept des *Kaizen* (japanisch: Das Gute verbessern) und fordert, allgemein gesprochen, eine stete Überprüfung sowie ggf. eine Verbesserung des zum Betrachtungszeitpunkt aktuellen Systemzustandes.

Grundsätzlich wurde die gesamte Methodik unter der Voraussetzung entwickelt, dass sie bei möglichst geringer Komplexität sowohl für die erste Planungsphase als auch für jedwede nachfolgende Anpassungsstufe anwendbar sein soll. Dies führte zu einer übergeordneten Struktur, welche, ausgehend von einer Lernzielanalyse nach *Benjamin S. Bloom* (Eisele und Kräft, 2012), auf die fünf aufeinanderfolgenden Schritte (1) Situationsanalyse, (2) Designentwicklung, (3) Implementierung, (4) Validierung, Lernen, Standardisieren, (5) Optimierung sowie das stets begleitende *Capacity Development* begrenzt werden konnte. Mithilfe der Optimierungsmethode können die zu Beginn eines Implementierungsvorhabens unzureichende Datengrundlage sukzessive verbessert und die neuen Erkenntnisse als Basis zur Festlegung von Anlagenoptimierungen angewandt werden.

Durch die Aufgliederung des ersten Schrittes („Situationsanalyse“) erfolgt die Anpassung des zunächst noch allgemeinen Problemlösungsansatzes für die Entwicklung, Implementierung und Anpassung der genannten WPS. Hierzu wurde die „DaTEF-Analyse“ (Daten, Technologie, Energie und Finanziellen) entworfen, deren einzelne Abschnitte zwar ihrer Priorität nach geordnet sind; eine sukzessive Bearbeitung wird jedoch nicht bei jedem Vorhaben realisierbar sein, da die Abschnitte gewollt ineinandergreifen und der Bearbeitungsaufwand in hohem Maße standortabhängig ist. Die Bewertung der generierten Datengrundlage ergibt sich jedoch implizit, da die Bearbeitung des nachfolgenden Abschnitts nur bei ausreichendem Kenntnisstand aus den vorausgehenden Untersuchungen erfolgen kann.

Der Abschnitt „Daten“ sieht zunächst die Bereitstellung von Planungsdaten (bspw. Abfluss, nutzbare Fallhöhe usw.) vor, soweit es die äußeren Umstände (je nach Zeitrahmen, Unterstützung durch lokale Institutionen usw.) zulassen. Darauf aufbauend folgt im Abschnitt „Technologie“ eine Vorauswahl geeigneter Maschinen für das WPS. Im dritten Abschnitt „Energie“ wird das WPS aus technischer und betrieblicher Sicht mit konventionellen und alternativen Fördersystemen verglichen, was einen entscheidenden Beitrag für den vierten Abschnitt, „Finanzen“, leistet. Dieser sieht die ökonomische Bewertung aller technisch realisierbaren Förderkonzepte für einen bestimmten Standort vor. Die Entscheidung, welches System letztlich umgesetzt werden soll, kann nach Bearbeitung aller vier Abschnitte auf einer umfassenden technisch-wirtschaftlichen Datengrundlage getroffen werden.

Mithilfe der vorgestellten Methodik kann auch die Ausarbeitung und Implementierung weiterer Teilsysteme bzw. des Gesamtsystems erfolgen. Hierzu ist lediglich ein Anpassung des ersten Schrittes „Standortanalyse“ auf das jeweilige Teilsystem erforderlich.

Bei der Planung von Maßnahmen zur Optimierung bereits realisierter Systeme wird die Methodik analog zur o.g. Beschreibung durchlaufen. Gemäß den Prinzipien des *Kaizens* bzw. KVP wird kein Abbruchkriterium definiert, da eine Anwendung über die gesamte Lebensdauer des betreffenden technischen Systems vorgesehen ist. Das Erreichen eines bestimmten Optimierungsgrades erfordert jedoch in Abhängigkeit von den jeweiligen Standortbedingungen eine unterschiedliche Anzahl an Iterationsstufen. Die Entscheidung zur Durchführung weiterer Optimierungsmaßnahmen soll daher durch eine Aufwand-Nutzen-Betrachtung getroffen werden.

Nachdem mit dem innovativen Implementierungsansatz ein wirkungsvolles Werkzeug zur Entwicklung und Anpassung von Wasserfördertechnologien und -konzepten bereitgestellt wurde, wird weiterhin die Frage nach geeigneten Strategien für deren Multiplikation erörtert. Hierbei wird vorausgesetzt, dass eine erfolgreiche Vervielfältigung untrennbar mit einem umfassenden Wissenstransfer bzgl. *Hardware* (Maschinen und Komponenten) und *Software* (Betriebsstrategie, Implementierungsansatz usw.) verbunden ist. In diesem Zusammenhang werden zwei Konzepte vorgestellt, die im Rahmen der F&E-Aktivitäten des IWRM-Indonesien-Verbundes sowie innerhalb eines Folgevorhabens in Nordvietnam (BMBF-gefördertes Verbundvorhaben „Vietnamesisch-Deutsche Kooperation zur Entwicklung nachhaltiger Technologien für die Karstwasserwirtschaft“, KaWaTech, Laufzeit 2013 bis 2016) entworfen und umgesetzt wurden.

Das erste Konzept beschreibt die Implementierung einer Demonstrationsförderanlage auf Basis eines im Hinblick auf die Anlage *Bribin* alternativen Förderkonzeptes (Schaffung eines Wasserkraftpotentials mittels Holzdruckrohr statt durch ein Sperrwerk), welche in Zusammenarbeit mit der Universität *Gadjah Mada, Yogyakarta*, Indonesien, realisiert wurde (Nestmann et al., 2015). Hierbei wird das zugehörige theoretische Fachwissen mithilfe praktischer Eigenerfahrungen nachhaltig transportiert und die Durchführung betriebsbegleitender Forschungstätigkeiten wie bspw. eine Langzeitanalyse der Förderleistung des WPS ermöglicht. Insgesamt kann somit ein umfassendes *Capacity Development* für verschiedene Zielgruppen (z.B. Studenten sowie Mitarbeiter von lokalen Behörden und Unternehmen aus dem Wasser- und Energiesektor usw.) geleistet werden.

Das zweite Konzept rückt das Ausloten der Anwendungsgrenzen der WPS in den Fokus, wobei ein eingehender Praxistest der Wasserfördertechnologie unter extremer mechanischer Belastung erfolgen soll. Diese Belastung ist zum einen auf die Topographie der Modellregion des KaWaTech-Vorhabens zurückzuführen. So sind aufgrund der starken Zerklüftung des Karstgebiets *Dong Van* Fall- und Förderhöhen von mehreren hundert Metern unvermeidlich. Zum anderen ergibt sich die Belastung aus einer zeitweise extremen Feststoffbeladung der Maschinen. Diese steht im Zusammenhang mit der Wasserentnahme aus einem natürlichen Fließgewässer, welches insbesondere nach (Stark-) Niederschlagsereignissen durch erhöhte Sedimentfrachten gekennzeichnet ist.

Die mithilfe dieser beiden Multiplikationsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse sollen den Wissensstand aus dem ursprünglichen F&E-Vorhaben in *Gunung Kidul*, Indonesien, deutlich erweitern. Dies soll dazu beitragen, das Anwendungspotential verschiedener WPS-*Hardware* (Maschinen) und -*Software* (zugehörige Förderkonzepte) weiter zu erschließen. Demzufolge können sich wissenschaftliche Arbeiten, welche an die vorliegende Dissertation anknüpfen, mit einer umfassenden Analyse der Fördersysteme in *Yogyakarta*, Indonesien, und *Dong Van*, Nordvietnam, befassen. Ergänzend können die vorgestellten technischen und betrieblichen Untersuchungen in der Pilotanlage *Bribin* fortgeführt werden. Auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse kann ggf. eine Adaption der vorgestellten Implementierungsmethodik erfolgen. Bspw. kann zur Vereinfachung der Planung und Implementierung eines WPS sowie zur nachträglichen Umrüstung einzelner Maschinen das in der vorliegenden Dissertation vorgestellte WPS-Auslegungsprogramm durch weitere Baureihen der KSB AG (und auch anderer Hersteller) ergänzt und in die Implementierungsmethodik integriert werden.

Literaturverzeichnis

- Adji TN (2010)** Variasi spasial-temporal hidrogeokimia dan sifat aliran untuk karakterisasi system karst dinamis di sungai bawah tanah Bribin, Kabupaten Gunung Kidul, DIY. Universität Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Alwardt C (2011)** Wasser als globale Herausforderung. Die Ressource Wasser. IFAR Working Paper #17. Hamburg.
- Auswärtiges Amt (2015)** Länderinformation Indonesien. URL: <http://www.auswaertiges-amt.de/DE/Aussenpolitik/Laender/Laenderinfos/01-Laender/Indonesien.html> (Online: Oktober 2015; abgerufen: 17.12.2015).
- Badan Pusat Statistik (2011)** Population of Indonesia by Village – Result of 2010 Population Census.
- Banfi G (2012)** Planung einer wasserkraftbetriebenen Wasserförderanlage in Yogyakarta, Indonesien, unter Verwendung von PAT-Technologie und einer Holzdruckrohrleitung zur Energiegewinnung. Diplomarbeit des Karlsruher Instituts für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung.
- Baumer JM (1983)** Angepasste Technik und die dritte Welt: Ein Arbeitsbericht der SKAT. 14. Auflage. Schweizerische Kontaktstelle für Angepasste Technik am ILE, Inst. für Lateinamerikaforschung und Entwicklungszusammenarbeit an der Hochschule St. Gallen. Baumer JM (Hrsg.).
- Biswas AK (2004)** Integrated Water Resources Management: A Reassessment. Water International. Volume 29, Nummer 2. Seiten 248–256. Juni 2004.
- BMU (2011)** Erneuerbare Energien – Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft. 8. Aktualisierte Auflage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit (Hrsg.). Berlin. Oktober 2011.
- BMZ (2006)** Der Wassersektor in der deutschen Entwicklungszusammenarbeit. BMZ-Materialien Nr. 154. Bonn.
- BMZ (2006a)** Sektorkonzept Wasser. BMZ Konzepte 143. Bonn. September 2006.
- BMZ (2012)** URL: <http://www.bmz.de/de/service/glossar/P/ppp.html> (Online: 06.01.2012; abgerufen: 17.12.2015)
- Bohl W, Elmendorf W (2004)** Strömungsmaschinen 1. Vogel Business Media/VM; 9., veränderte Auflage. ISBN 978-3802319808. Juni 2004.

- Bohner E, Fenchel M, Müller HS (2009)** Konzeption und Herstellung eines unterirdischen Betonsperrwerks zur Trinkwassergewinnung auf Java. In: WasserWirtschaft, 99. Jhrg.(2009), Heft 7-8, Seite 47-52.
- Breiner R, Bohner E, Fenchel M, Müller HS, Mutschler T, Triantafyllidis T (2011)** Grouting of an Underground Concrete Barrage in Karst Limestone. Asian Trans-Disciplinary Karst Conference, Haryono et al. (Hrsg.), Fakultät für Geographie, Gadjah Mada Universität, Yogyakarta. Seite 181-190.
- Brunner P (2011)** Folgen einer intensiven Bewässerungslandwirtschaft am Beispiel des Yanqi-Beckens, China. WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3. Auflage. Hrsg. Lozán. S. 425-429.
- Brunsch A, Adji TN, Stoffel D, Ikhwan M, Oberle P, Nestmann F (2011)** Hydrological Assessment of a Karst Area in Southern Java with Respect to climate Phenomena. Asian Trans-Disciplinary Karst Conference, Hrsg. Haryono, E. et al., Faculty of Geography, Gadjah Mada Universität, Yogyakarta, 2011 (Seite 55 - 68).
- Bücker J (2012)** Konzeption eines Biogassystems für Gunung Kidul, Indonesien. Diplomarbeit des Karlsruher Instituts für Technologie. Institut für Technische Thermodynamik. 13.05.2012.
- CIA (2015)** Länderinformation Indonesien. URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/id.html> (Online: 07.12.2015; abgerufen: 17.12.2015).
- Cloutier M, Rowley P (2011)** The feasibility of renewable energy sources for pumping clean water in sub-saharan Africa: a case study for Central Nigeria. Renewable Energy, 36 (8). Seite 2220-2226.
- Davis M (2007)** Planet of Slums. Verso. ISBN: 978-1-84467-160-1. New York.
- Deutsche Bank Research (2011)** Wasser: EUR 500 Mrd. Investitionen notwendig – pro Jahr! Wirtschaft & Politik. Research Briefing.
- Dittmann A, Fach S, Fuchs S, Hossu M, Nestmann F, Oberle P (2011)** Aspekte des Wasserressourcen-Managements in Karstgebieten am Beispiel der Region Gunung Kidul auf Java, Indonesien. Hydrology and Water Resources Management, 55 / 2: 57-67.
- DVGW (1994)** Energierückgewinnung durch Wasserkraftanlagen in der Trinkwasserversorgung. Arbeitsblatt W 613. Technische Mitteilung. ISSN 0176-3490. Eschborn. August 1994.
- DVGW (2005)** Anforderungen an die Qualifikation und die Organisation von Trinkwasserversorgern. Arbeitsblatt W 1000. Technische Regel. ISSN 0176-3504. Bonn. November 2005.
- Ebaid MSY, Qandil H, Hammad M (2013)** A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer. Energy Conservation and Management 75. Seite 780-795.
- ECN (2003)** Hydropower Development with a focus on Asia and Wetsern Europe, Overview in the framework of VLEEM 2, <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03027.pdf>. (Online: Juli 2003; abgerufen 18.12.2015)

- EIA (2010)** International Energy Outlook 2010 – Highlights. URL: <http://www.eia.gov/oiaf/archive/ieo10/highlights.html> (Online: 25.05.2010; abgerufen: 17.12.2015)
- Eisele L, Kräfft A (2012)** Skript Unterrichtsplanung Unterrichtsmethoden. Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Berufliche Schulen) Karlsruhe. November 2012.
- EKONID (2013)** Zielmarktanalyse Indonesien 2013. Photovoltaik-Hybrid-Kraftwerke für den Off-Grid- und Mini-Grid-Einsatz. Mit Profilen der Marktakteure. Hrsg. Deutsch-Indonesische Industrie- & Handelskammer (EKONID). Jakarta.
- EuPD Research (2013)** Photovoltaik-Preismonitor Deutschland – Ergebnisse 1. Quartal. Bundesverband Solarwirtschaft.
- Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C (1989)** Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. Aspects of vulnerability in semi-arid development. Natural Resources Forum 0165-0203/89/040258-1. Butterworth & Co Ltd. November 1989.
- FAO (2008)** Coping with water scarcity. An action framework for agriculture and food security. FAO Water Reports 38. ISSN 1020-1203. Rom. UN.
- Fischer R (2013)** Elektrische Maschinen. 16., aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-4464-3813-2. 01.10.2013.
- Flacke L, Müller M, Schelten A (2011)** Die Taxonomie Tabelle – Anerkennung durch Transparenz. Technische Universität München, Lehrstuhl für Pädagogik.
- Flathe H, Pfeiffer D (1965)** Grundzüge der Morphologie, Geologie und Hydrogeologie im Karstgebiet Gunung Sewu/Java (Indonesien). Bundesanstalt für Bodenforschung und den Geologischen Landesämtern der BRD (Hrsg.): Geologisches Jahrbuch 83. Seite 533 - 559.
- FNR (2012)** Basisdaten Bioenergie Deutschland. Fachagentur nachwachsende Rohstoffe. Bestell-Nr. 469. Gülzow-Prüzen. August 2012.
- Fraunhofer ISE (2013)** Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Bereich Photovoltaische Module, Systeme und Zuverlässigkeit. 09.07.2013.
- Fraunhofer ISI (2009)** Produktionsverlagerung und Rückverlagerung in Zeiten der Krise. Modernisierung und Produktion, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung. Ausgabe 52. Dezember 2009.
- Fritz J, Rösler W, Schmidt S, Stoffel D, Oberle P, Nestmann F (2012)** Using Pumps as Turbines Combines with Pumps for Water Supply in an efficient Way without the need of Electrical Power. Tagungsband IWRM Karlsruhe 2012. Seite 312-319. Karlsruhe 21.-22.11.2012.
- Geckler D (2006)** Die Stückliste ist die Mutter aller Daten – Produktdatenmanagement in der Anwendung. Schwerpunkt projekt MANAGEMENT aktuell. 4/2006. Seite 42-48.
- Gerybadze A (2003)** Knowledge Management and Transnational R&D Projects: The Role of Asymmetric Understanding and Group Cognition Processes in Distributed Work. Discussion-Paper 03-01. ISSN 1433-531X. Stuttgart, Oktober 2003.
- Glameyer C (2015)** Typen und Stufen von Lernzielen. Lehre Laden – Downloadcenter für inspirierte Lehre. Büro für Personal Coaching. URL: <https://dbs->

lin.rub.de/lehreladen/planung-durchfuehrung-kompetenzorientierter-lehre/lehr-und-lernziele/typen-und-stufen/ (Online: 2015; abgerufen: 18.12.2015)

- Goldscheider N, Drew D (2007)** Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis. International Contributions to Hydrogeology.
- Goldstein R, Smith W (2002)** Water & Sustainability (Volume 4): U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - The Next Half Century. Technical Report 1006787.
- Gresse C (2010)** Wissensmanagement im Technologietransfer. Einfluss der Wissensmerkmale in F&E-Kooperationen. Dissertation der Universität Hohenstein. Springer Gabler Verlag. 1. Auflage. ISBN 978-3-8349-2381-3.
- Grobosch M (2003)** Grundwasser und Nachhaltigkeit. Zur Allokation von Wasser über Märkte. Inaugural-Dissertation der Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- Gülich JF (2010)** Kreiselpumpen – Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb. 3., korrigierte und ergänzte Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-05478-5
- gtai (2012)** Germany Trade & Invest. URL: (Online: 12.06.2012; abgerufen: 02.09.2013)
- gtai (2015)** Indonesien – Gesellschaftsrecht. Germany Trade & Invest. URL: <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/Recht-Zoll/Wirtschafts-und-steuerrecht/suche,t=indonesien--gesellschaftsrecht,did=946676.html> (Online 21.01.2014; abgerufen: 18.12.2015)
- gtz (2009)** Integrated Water Resources Management (IWRM). Water Section. Eschborn. Dezember 2009.
- gtz (2009a)** Energiepolitische Rahmenbedingungen für Strommärkte und erneuerbare Energien. 16 Länderanalysen. Studienreihe Energiepolitische Rahmenbedingungen, Kompetenzfeld „Energie und Transport“. Seite 312 - 335.
- gtz (2010)** Wasser. Das Magazin der GTZ: akzente. Ausgabe 03-04/10. ISSN 0945-4497. Eschborn. Oktober 2010.
- Haryono E, Day M (2004)** Landform Differentiation within the Gunung Kidul Kegelkarst, Java, Indonesia. Journal of Cave and Karst Studies 66 (2). Seite 62 - 69.
- Hellmann DH (2009)** Kreiselpumpen-Lexikon. 4. Überarbeitete und erweiterte Auflage. KSB Aktiengesellschaft (Hrsg.). Ottweiler Druckerei und Verlag GmbH. ISBN 978-3-00-029711-3. Dezember 2009.
- Heuer N (2011)** The Effect of Occupation-Specific Brain Drain on Human Capital. University of Tübingen Working Papers in Economics and Finance, No.7.
- Hoekstra AY, Mekonnen MM (2012)** The water footprint of humanity. PNAS vol. 109, no.9. ISSN 3232-3237. 28.02.2012.
- Hossu M (2013)** Die Rolle interner und externer Akteure bei der Entwicklung des ländlichen Java. Das Beispiel Gunungkidul. Dissertation des Instituts für Geographie der Justus-Liebig-Universität Gießen,.

- Hüttl RFJ (2011)** Ein Planet voller Überraschungen – Neue Einblicke in das System Erde. Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 978-3-8274-2470-9, Hüttl RFJ (Hrsg.), Heidelberg 2011.
- IEA (2008)** Energy Policy Review of Indonesia. International Energy Agency OECD/IEA. ISBN - 78-92-64-04828-7. Paris.
- IISD (2014)** Indonesia Energy Subsidy Review. Issues 1, Vol. 1. International Institute for Sustainable Development. März 2014.
- IPCC (2007)** Häufig gestellte Fragen und Antworten. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen, Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC), Solomon S et al. (Hrsg.). Cambridge University Press. Großbritannien und USA.
- ISO 10816-1 (1997)** Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen – Teil 1: Allgemeine Anleitung. Deutsche Norm. August 1997.
- Jekel T (2013)** Digital Working für Manager. Mit neuen Technologien effizient arbeiten. GABAL Verlag GmbH, Offenbach. ISBN 978-3-86936-521-3.
- Jéquier N (1976)** Appropriate technology. Organization for Economic Co-operation and Development. Jéquier N (Hrsg.). ISBN 92-64-11492-0. Paris.
- Jéquier N, Blanc G (1983)** The world of appropriate technology: a quantitative analysis. ISBN 92-64-12433-0. Paris.
- Kalide W, Sigloch H (2010)** Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen: Kolbenmaschinen – Strömungsmaschinen – Kraftwerke. 10. neu bearbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-4464-1779-3. 5. August 2010.
- Karger R, Hoffmann F (2013)** Wasserversorgung. Gewinnung – Aufbereitung – Speicherung – Verteilung. 14., vollständig aktualisierte Auflage. Springer Vieweg Verlag. ISBN 978-3-8348-1380-0. Wiesbaden.
- KEMENNEG PDT (2005)** Ministerdekret 001/KEP/M-PDT/II/2005. National Development Strategic for Disadvantaged Regions.
- Kessler-Thönes T (2008)** Management-, Mitarbeiter- und Kundenmotivation als Determinanten der Zahlungsbereitschaft von Dienstleistungskunden – Eine empirische Mehrebenenanalyse. Marktorientiertes Management. 1. Auflage. Gabler Edition Wissenschaft. Lingenfelder M (Hrsg.). Dissertation der Universität Marburg. ISBN 978-3-8349-1363-0. Wiesbaden. 2008.
- KfW (2008)** Wasser – lebensnotwendig und knapp. Förderung der Entwicklungsländer. Frankfurt a.M. Februar 2008.
- Khennas S, Barnett A (2000)** Best Practice for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Developing countries. Technischer Bericht UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP). Washington.
- Klaphake A, Scheumann W (2001)** Politische Antworten auf die globale Wasserkrise: Trends und Konflikte. Politik und Zeitgeschichte. B 48-49/2001.

- Kleine M (2015)** Konzeptstudie zur wasserkraftbetriebenen Wasserförderung unter extremen naturräumlichen Gegebenheiten. Masterarbeit des Karlsruher Instituts für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung.
- Klingel P, Lagrou D, Chung HT, Kunze M, Oberle P, Nestmann F, Van TT, De Bontridder L (2011)** Sustainable technologies for karst water management for the Dong Van Karst Plateau: approach and first investigations. Tagungsband of Second Asia-Pacific Geoparks Network Symposium on Geopark and Geotourism for Regional Sustainable Development (APGNSymp2011). Hanoi. 16.-24.07.2011.
- Klöpffer W, Grahl B (2009)** Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden Für Ausbildung und Beruf. 1. Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 978-3-5273-2043-1. 11.03.2009.
- Kostka C, Kostka S (2011)** Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess – Methoden des KVP. 5. Auflage. Carl Hanser Verlag München. ISBN 978-3-446-42568-2.
- KSB AG (2012)** Pumpe als Turbine – Richtungweisend für mehr Energie. 0291.021-DE/3 / 07.12.
- Kucher A (2015)** Korruption und Korruptionsbekämpfung in Indonesien – Ein Vergleich der Suharto-Jahre mit den ersten Jahren in *Reformasi*. Dissertation der Philosophischen Fakultät der Friedrich Wilhelms Universität Bonn, URN nbn:de:hbz:5-42018.
- Kudella P, Loges I, Mutschler T, Eiche E, Ruppert J, Neumann T (2015)** Bypassing and tightening of the HPP Bribin water retention system in Permeable Karst (Arbeitstitel). Eingereicht bei Applied Water Sciences, SpringerOpen Journal.
- Lehmann H (1936)** Morphologische Studien auf Java. Fuchs S., Gerstenhauer A., Pfeffer K.-H. (Hrsg.), 1987. Beiträge zur Karstmorphologie, Erdkundliches Wissen 86, Seite 23 – 67. Stuttgart.
- Lenton R (2011)** Integrated Water Resources Management. Treatise on Water Science, Four-Volume Set. Newnes Verlag. ISBN 978-0-4445-3199-5.
- Lexikon der Nachhaltigkeit (2015)** Brundtland Bericht, 1987. URL: http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/brundtland_report_563.htm?sid=304b54f9940b90acabe2f5f77212fc1e (Online: 13.11.2015; abgerufen 17.12.2015)
- Lülfes R (2013)** Nachhaltigkeit und organisationales Lernen – Eine transdisziplinäre Analyse. Dissertation der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Springer Gabler. ISBN 978-3-658-00304-3. Wiesbaden. 2012.
- Lux T (2004)** Sozioökonomische Auswirkungen einer verbesserten Wasserversorgung auf die lokale Bevölkerung in Gunung Sewu, Indonesien. Masterthesis Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Geographie.
- MacDonald and Partners (1984)** Greater Yogyakarta Groundwater Study – Vol. 8 Water Supply. Report (unveröffentlicht). Mac Donald and Partners, London.
- Mastaller M (2013)** Re-Dimensioning of the Flood Relief System of an Underground Water Extraction Plant in Java, Indonesia. Masterarbeit der TU München, Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft. 31.01.2013.
- Milanovic P (2002)** The environmental impacts of human activities and engineering construction in karst regions. Episodes, vol. 25, No.1: 13-21.

- Miller D (2005)** E-Learning – Eine multiperspektivische Standortbestimmung. 1. Auflage. Haupt Verlag. Miller D (Hrsg.). ISBN 978-3-2580-6898-5. 01.12.2005.
- Mutschler T, Triantafyllidis T (2009)** Geotechnische Aspekte beim Bau einer unterirdischen Staumauer in verkarsteten Riffkalken. WasserWirtschaft 99, Heft 7-8. Seite 53-56.
- Mutschmann J, Stimmelmayer F (2011)** Taschenbuch der Wasserversorgung. Vieweg+Teubner Verlag, 15. edition, Wiesbaden, 2011.
- Nestmann F, Oberle P, Ikhwan M, Lux T, Scholz U (2009)** Bewirtschaftung unterirdischer Fließgewässer in Karstgebieten – Pilotstudie auf Java, Indonesien, In: WasserWirtschaft 99, Heft 7-8.
- Nestmann F, Oberle P, Ikhwan M, Klingel P (2010)** Adaptive Water Resources Management under Extreme Climatic and Hydrogeological Conditions - Interdisciplinary Research activities in Karst Regions of South East Asia. Tagungsband IWRM-Karlsruhe 2010. Seite 300 - 307. November 2010.
- Nestmann F, Oberle P, Ikhwan M, Neumann T, Eiche E, Dittmann A, Scholz F, Tkaczick T (2010a)** Innovative Water resources Mobilization in Karst Areas – Indonesian Experience and Transferability Potential. Yogyakarta.
- Nestmann F, Oberle P, Ikhwan M, Stoffel D (2012)** Experiences Concerning the Implementation of Innovative Technologies and Management strategies in Emerging Countries: Example IWRM Indonesia. Konferenzband IWRM Karlsruhe 2012, Karlsruhe, November 21. – 22., 2012, pp.41-53.
- Nestmann F, Oberle P, Ikhwan M, Stoffel D, Blaß HJ, Töws D, Schmidt S (2015)** Transfer of adapted water supply technologies through a demonstration and teaching facility (Arbeitstitel). Eingereicht bei Applied Water Sciences, SpringerOpen Journal.
- Neumann T, Benner Z, Stuben D, Bahri S, Jaya M (2009)** Geowissenschaftliche Bewertung von Karsthöhlen für die Wasserbewirtschaftung in Gunung Sewu. WasserWirtschaft 99, Heft 7-8. Seite 31-36.
- Nibbering JW (1991)** Crisis and resilience in upland use in Java. Indonesia: Resources, Ecology and Environment. Hrsg Hardjono J. Oxford: Seite 104 - 132.
- Oberle P, Nestmann F (2006)** Bau unterirdischer Wasserspeicher in Karstgebieten auf Java. Wasserbausymposium Graz 2006: Stauhaltungen und Speicher von der Tradition zur Moderne. TU Graz. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Bd. 46/1. Seite 406-421.
- Oberle P, Ikhwan M, Nestmann F, Fritz J, Ravisundar T (2009)** Angepasste Wasserfördertechnologie unter Einsatz von Pumpen im Turbinenbetrieb. WasserWirtschaft 99, Heft 7-8. Seite 57-63.
- Oberle P (2011)** Hydrologische Studien in der Karst Region Gunung Kidul, Indonesien, unter Berücksichtigung von Klimaphänomenen. Hydrobrief, Fachgemeinschaft für Hydrologische Wissenschaften (FgHW). Seite 3 - 5. Dezember 2011.
- Oberle P, Stoffel D, Ikhwan M, Nestmann F (2012)** Wasserkraftbetriebene Pumpsysteme als Grundlage einer nachhaltigen Wasserversorgung. Wasserbau Symposium 2012: Wasser – Energie, Global denken – lokal handeln. Tagungsband Zenz G (Hrsg.). TU Graz 2012. Seite 651-660.

- Odeh I (2014)** Production Economic feasibility of large scale PV water pumping applications utilizing real field data for a case study in Jordan. International Journal of Renewable Energy Development 3 (2) 2014. Seite 107-117.
- OECD (2008)** The Brain Drain and Negative Social Effects: When is the Home Country Hurt? Policy Coherence for Development 2007, Migration and Developing Countries. ISBN: 978-92-64-03311-5.
- OECD (2012)** OECD Reviews of Regulatory Reform: Indonesia 2012: Strengthening Co-Ordination and Connecting Markets. OECD Publishing. ISBN 978-92-64-17363-7.
- Pfeffer KH (2010)** Karst: Entstehung – Phänomene – Nutzung. Gebr. Borntraeger. ISBN 978-3-443-07147-9. Stuttgart.
- Rogge S (2004)** Geothermische Stromerzeugung in Deutschland Ökonomie, Ökologie und Potenziale. Dissertation der Technischen Universität Berlin.
- Ruppert J (2013)** Hydro- und Isotopengeochemische Charakterisierung der Verkarstungsprozesse und Fließdynamik am Stauwerk Bribin-Sindon. Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie.
- Saak M (2006)** Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototypen für ein rechnergestütztes Werkzeug zum effizienten Einsatz der Problemlösungsmethodik „SPALTEN“. Forschungsberichte Band 23. Dissertation des Karlsruher Instituts für Technologie, Institut für Produktentwicklung Karlsruhe. Albers A (Hrsg.). ISSN 1615-8113.
- Schlichting HJ (1984)** Fahrradfahren, Laufen, Autofahren – Ein interessanter Vergleich im Unterricht. technic-didact 9/3, 177 (1984) (65).
- Schlumpf (2012)** Hydraulische Widder. Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten und –grenzen. URL: http://www.schlumpf.ch/hp/hw/hw_dt.htm (Online: 02.02.2012; abgerufen: 17.12.2015)
- Schneider A (2011)** Energieumwandlung mit Eigenresonanz. Autonome Energiesysteme. NET-Journal Jg. 16, Heft Nr. 5/6. Mai/Juni 2011.
- Scholz U, Unger B, Lux T (2004)** Sozioökonomische Analyse potenzieller Wassernutzer in Mitteljava, Indonesien. BMBF Projektbericht. Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Geographie.
- Schumacher Center (2012)** Technical Brief: Solar (Photovoltaic) Water Pumping. Practical action. Großbritannien.
- Schumacher EF (1973)** Small is beautiful. Economics as If People Mattered. Blond & Briggs. ISDN 978-0-06-091630-5. London
- Siemens AG (2008)** FLENDER Kupplungen. Katalog MD 10.1 2008.
- Singh P (2005)** Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for Pumps as Turbines with Field Implementation and Evaluation. Dissertation des Karlsruher Instituts für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung.
- SRU (2013)** Fracking zur Schiefergasgewinnung. Ein Beitrag zur energie- und umweltpolitischen Bewertung. Stellungnahme Nr. 18. ISSN 1612-2968. Berlin.

- UBA (2013)** Wasserressourcen und ihre Nutzung. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser-als-ressource/wasserressourcen-ihre-nutzung> (Online: 30.10.2013; abgerufen: 17.12.2015)
- UFZ (2011)** Wasser und Altlasten. Grundwasser als erneuerbare Ressource. URL: <http://www.ufz.de/index.php?de=22181> (Online: Dezember 2011; abgerufen: 17.12.2015)
- Uhlig H (1980)** Man and Tropical Karst in Southeast Asia: Geo-ecological differentiation, land use and rural development potentials in Indonesia and other regions. *GeoJournal* 4.1.. Seite 31 - 44.
- UNESCO (2003)** Wasser für Menschen, Wasser für Leben. Weltwasserentwicklungsbericht der Vereinten Nationen. UNO-Verlag GmbH.
- UNESCO-IHE (2008)** Water Footprint of Bio-Energy and Other Primary Energy Carriers. Value of Water Research Report Series No. 29. Delft.
- UNICEF und WHO (2012)** Progress on Drinking Water and Sanitation. 2012 Update. ISBN: 978-92-806-4632-0. New York.
- USAID (2008)** Indonesian Port Sector Reform and the 2008 Shipping Law. United States Agency for International Development. August 2008.
- Van TT, Lagrou D, Masschelein J, Duser M, Ke TD, Viet HA, Quyet DX, Thang DV, Chung HT, Anh DT (2004)** Karst Water Management in Dong Van and Meo Vac Districts, Hà Giang Province, Vietnam. Tagungsband International Transdisciplinary Conference on Development and Conservation of Karst Regions. Hanoi.
- VDI (2008)** Wasserknappheit & Technologie. Übersichtsstudie. Zukünftige Technologien Nr. 76. ISSN 1436-5928. Düsseldorf. 2008.
- VDI (2010)** Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. VDI-Richtlinien 4640. ICS 27.010, 27.080, 27.200. Juni 2010.
- Walcher H, Lösche M, Oberle P (2009)** Steuer- und Regelungskonzept für den modularen Betrieb der unterirdischen Wasserförderanlage Bribin. In: *WasserWirtschaft* 99, Heft 7-8. Seite 69-73.
- Waltham AC, Smart PL, Friedrich H, Atkinson TC (1985)** Exploration of caves for rural water supplies in the Gunung Sewu Karst, Java. *Annals de la Societe Geologique de Belgique* T. 108. Seite 27-31.
- Wegert S, Georgiev G (2012)** Analyse der Potentiale zur energetischen Biomassenutzung in der Region Dresden – im Rahmen des Modellvorhabens der Raumordnung der Metropolregion Mitteldeutschland „Partnerschaft der Stadtregionen“. Teilbericht II Erschließbare Endenergie aus Biomasse. DREBERIS GmbH. 26.03.2012.
- Weidemann HJ (2003)** Schwingungsanalyse in der Antriebstechnik. Auflage 2003. Springer. ISBN 978-3-5404-2010-1. 09.04.2003.
- Weltbank (2003)** Indonesia Environment. Special Focus: Reducing Pollution. World Bank Indonesia Office. Jakarta. Januar 2003.
- Weltbank (2007)** Executive Summary: Indonesia and Climate Change. Working Paper on Current Status and Policies. März 2007.

- Wembacher M (2013)** Wasserpumpen in der Entwicklungshilfe. Interdisziplinäres Projekt. Hochschule RheinMain, Institut für Umweltmanagement und Stadtplanung in Ballungsräumen.
- Weniger J, Bergner J, Tjaden T, Quaschnig V (2015)** Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende. Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin Fachbereich 1 – Ingenieurwissenschaften Energie und Information. Berliner Wissenschafts-Verlag. ISBN 978-3-8305-3548-5. Juni 2015.
- Werdich M (2011)** FMEA – Einführung und Moderation. 2., überarbeitete und verbesserte Auflage. Werdich M (Hrsg.). Springer Vieweg Wiesbaden. ISBN 978-3-8348-1787-7. Wangen.
- White WB (1988)** Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York.
- WHO (2005)** Minimum water quantity needed for domestic uses. WHO/SEARO Technical Notes No. 9. Reed BJ & Reed RA (Hrsg.).
- Williams P, Ford D (2006)** Global distribution of carbonate rocks. Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. Band 147, S.1-2.
- Wissner C (2010)** Beiträge zum Fail Safe Design. KIT Scientific Publishing. Dissertation des Karlsruher Instituts für Technologie. ISBN 978-3-86644-520-8.
- WWAP (2012)** The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO.
- WWF (2009)** Der Wasser-Fußabdruck Deutschlands. Woher stammt das Wasser, das in unseren Lebensmitteln steckt? WWF Deutschland. Frankfurt a.M.
- Zahoransky RA (2002)** Energietechnik. Kompaktwissen für Studium und Beruf (Studium Technik). 1. Auflage. Vieweg Verlag. ISBN 978-3-5280-3925-7. 14.08.2002